# موثوقية

## فَعَمِلَ اللهُ الْجَلَدَ ،
## وَفَصَلَ بَيْنَ الْمِيَاهِ الَّتِي تَحْتَ الْجَلَدِ وَالْمِيَاهِ الَّتِي فَوْقَ الْجَلَدِ

تكوين 1:7




إعداد / هنرى ناجى فوزى

# موثوقية

فَعَمِلَ اللهُ الْجَلَدَ،

وَفَصَلَ بَيْنَ الْمِيَاهِ الَّتِي تَحْتَ الْجَلَدِ وَالْمِيَاهِ الَّتِي فَوْقَ الْجَلَدِ.

تكوين 6:1

إعداد / هنرى ناجى فوزى

# فهرس الموضوعات

# المقدمة

**العمر الزمنى للكرة الأرضية هو 10000 سنة كما أثبتنا ذلك في بحث آخر**

**ولكن للآمانة العلمية في هذا البحث نقل العمر المفترض للكرة الأرضية على لسان الباحثين كما هو، ولكن هذا ليس صحيحاً**

**قبل عشر سنوات لم تكن المعلومات الواردة في هذا البحث متاحة وذلك لعدم قدرة العلم للوصول إلى تلك المعلومات، كذلك الحال فبعد عشر سنوات من الآن سيكف العلم عن المزيد من الحقائق الجديدة والتى لم تكن نعرفها الآن.**

**منذ عشرات السنوات سابقة كانت معظم الحقائق العلمية الواردة في هذا البحث كانت لم يكتشفها العلم بعد، وذلك تكن العلوم الوقتية في العصور السابقة قادرة على تفسير ما جاء في الأصحاح الأول من سفر التكوين وذلك بسبب عجز هذه العلوم الوقتية وافتقارها، وعلى النقيض فكلما تقدم الزمن سيكون هناك تقدم اكثر وأكثر في العلوم وسيصبح العلم أكثر قدرة على شرح ما ورد في الأصحاح الأول من سفر التكوين**

بحسب الكتاب المقدس فإن الماء أصل كل شيء (تكوين 2:1 ، 6-10). الماء (غالبًا على شكل جليد) موجود في كل مكان في النظام الشمسي: في المذنبات، وحلقات الكواكب، وعلى أقمار الكواكب الكبيرة، وربما على الكويكب سيريس Ceres ، وعند قطبي قمر الأرض، وكان موجودًا سابقًا على كوكب الزهرة[1]، وهو موجود حاليًا على الأرض وفي أعماق غلافها الصخري، وفي القطبين الجليديين للمريخ. ربما يكون الماء، على شكل كتل جليدية متساقطة، قد شكّل العديد من الفوهات التي نراها في كل مكان في النظام الشمسي. يسأل الله: "... أَدَخَلْتَ إِلَى خَزَائِنِ الثَّلْجِ، أَمْ أَبْصَرْتَ مَخَازِنَ الْبَرَدِ...؟" (أيوب ٣٨: ٢٢). سيعرف قراء كتابي، ضوء النجوم والزمن، أنني بنيت كلاً من علم الكونيات الذي يفترض أن العالم صغير السن ونظرية أصول المجال المغناطيسي للنظام الشمسي على الاقتراح التوراتي بوجود الماء في البداية.

**جميع النظريات القديمة التي كاننت تفترض أن الكرة الأرضية هي فقط التي يتواجد فيها المياه، أصبحت غير صحيحة، فقد ثبت أن المياه قد سبق تكوينها تكوين الكواكب وأيضاً تكونت المياه قبل أن**

---

[1] Science News, ‘Venus: The Waters of Yesteryear’, 120:372–373, Dec. 12, 1981 (

تتشكل النجوم نفسها، فهناك كواكب وأقمار في المجموعة الشمسية متواجد فيها المياه، وكذلك تم رصد مجموعات نجمية أخرى متواجد فيها المياه، وكذلك تبت أنه كما يوجد غلاف جوى للأرض كذلك الحال من الكواكب الأخرى، وقد تم دراسة بعض النماذج في هذا البحث.

تتجه معظم الدراسات الحديثة إلى أن أصل الماء في نظامنا الشمسي أن ما يصل إلى نصفه قد تشكل قبل ولادة الشمس نفسها، وتشير النتائج إلى أن مياه الأرض ربما تكون قد نشأت من السديم الشمسي، وهو سحابة من الغاز والغبار تشكلت منها الشمس والكواكب، أثناء تشكل النظام الشمسي، مرّ هذا الماء بدورات تحول فيها إلى غاز ثم عاد إلى جليد، ليصبح في النهاية جزءًا من كواكب مثل الأرض.

و تشير أبحاث جديدة إلى أن الأرض القديمة كانت عالمًا مائيًا، يكاد يخلو من اليابسة، فالكويكبات، قد تشكلت جليدية في قرص بدائي بارد، فمع اختفاء هذا القرص الفتي، بدأت الكويكبات، مع ارتفاع درجة حرارتها، بإطلاق جليدها تدريجيًا على شكل بخار ماء. ثم شكّل بخار الماء هذا قرصًا جديدًا، يتكون في معظمه من الماء، يحيط بحزام الكويكبات ويدور حول الشمس. تحت تأثير القوى الديناميكية، انتشر قرص بخار الماء هذا تدريجيًا، ليصل في النهاية إلى الكواكب الداخلية للمجموعة الشمسية، بما فيها الأرض. وعندما وجدت الكواكب نفسها في هذا المحيط من بخار الماء، تمكنت من امتصاص جزء منه، مما ساهم في تكوين المحيطات. يمكن لهذه الآلية أيضًا أن تفسر وجود الماء على كواكب أخرى في المجموعة الشمسية.

فوجود الماء في المجرات البدائية نتيجة لتكوّنه المبكر في هالاتها المكونة لها. وقد تصل نسبة كتلة الماء في بقايا المستعرات العظمى المنتشرة التي استوعبتها هذه المجرات إلى $10^{-10}$، أي أقل بعشر مرات فقط مما هي عليه في مجرتنا درب التبانة اليوم. وقد تفكك جزء من هذا الماء ضوئيًا بفعل النجوم الضخمة ذات المحتوى المعدني المنخفض في هذه المجرات، أو دُمر بفعل تفاعلات كيميائية أخرى عندما بلغت مستويات أعلى من المحتوى المعدني في مراحل لاحقة. ومع ذلك، فإن ازدياد نسبة الغبار في المجرات المبكرة كان من شأنه أن يحمي الماء من الأشعة فوق البنفسجية ويخفف من تدميره إلى حد ما.

فالشمس والكواكب تشكلت معًا في سحابة عملاقة دوارة من الغاز والغبار تُسمى السديم الشمسي. تُظهر الملاحظات الفلكية أقراصًا محيطة بالنجوم متشابهة بشكل لافت. داخل السديم الشمسي، تجمعت المواد أولًا لتُشكّل كويكبات صغيرة؛ وتجمع العديد منها معًا لتكوين الكواكب والأقمار. أما الباقي فلا يزال يُرى على شكل مذنبات وكويكبات. من المحتمل أن جميع الأنظمة الكوكبية قد تشكلت بطرق متشابهة، لكن العديد من أنظمة الكواكب الخارجية تطورت على مسارات مختلفة تمامًا، كما سنرى في "العينات الكونية وأصل النظام الشمسي".

أن المياه تغطى أكثر من 70% من مساحة الكرة الأرضية كلها،والآن تتفق جميع الدراسات أن باطن الكرة الأرضية أيضاً يحتوى على كميات هائلة من المياه يقدر حجمها 4-6 مرات حجم المياه الموجودة على سطح الكرة الأرضية، كذلك هناك دراسات وأبحاث كثيرة ظهرت حديثاً تؤكد أن الكرة الأرضية كانت مغطاة ومطمورة في المياه عند نشأتها، وأن عمر المياه زمنياً هي أقدم من عمر الكرة الأرضية

كانت التفسيرات القديمة تذكر أن المياه التي فوق الجلد هي الغلاف الجوى، ولكن بالرجوع إلى االنص العبرى لمعنى مصطلح جلد רָקִיעַ raki'a ومقارنته مع السَّمَاوَاتِ השמים shm'im ، فسنعرف أن المقصود بالجلد هو المجموعة الشمسية والمقصود بالسماوات ههو الكون كله ، يمكن تفسير المياه التي فوق الجلد بأنه سحابة أورت، واالمياه التي تحت الجلد بأنه المياه الموجودة في الكواكب وحزام كايبر وحزام الكويكبات، فسحابة أورت توجد خارج المجموعة الشمسية وتعلوها

عيد دخول السيد المسيح أرض مصر 1 يونيو 2026

هنرى ناجى فوزى

# تفسير المعنى المقصود بـ الجلد

فـُىقّ ِبذّ؟ خِلهِئ لُسمئِقِ ةُ قِئلِآنّص. تكوين 1:1

**בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ**

قِنِلئِئ 9 لِيُكَمّ جِلقَـُى مِصِقّمُيِن- لِيِكَهّ صِلِيّمِمُيِن مِمُيِن -تكهيم 59

**ויאמר אלהים יהי רקיע בתוך המים ויהי מבדיל בין מים למים**

يوجد خلاف كبير حول ما خلقه الله في اليوم الثاني من أسبوع الخلق في سفر التكوين 1. هل يُطلق عليه "السماء" أم "الفضاء"؟ هل كانت السماء أو الفضاء هو الغلاف الجوي للأرض حيث توجد الطيور والسحب؟ أم كانت قبة أو غطاءً صلبًا يشبه المعدن فوق الغلاف الجوي، وُضعت تحته أو فيه الشمس والقمر والنجوم؟

فى البداية عندما خلق الله السماء والأرض استخدم سفر التكوين كلمة shm'im

"فِي الْبَدْءِ خَلَقَ اللهُ السَّمَاوَاتِ השמים shm'im وَالأَرْضَ"

وفى اليوم الثانى عندما خلق الله الجلد ليكون فاصلاً بين مياه ومياه استخدم سفر التكوين كلمة רָקִיעַ raqiya

"وَقَالَ اللهُ: «لِيَكُنْ جَلَدٌ רָקִיעַ raki'a فِي وَسَطِ الْمِيَاهِ. وَلْيَكُنْ فَاصِلاً بَيْنَ مِيَاهٍ وَمِيَاهٍ"

# والآن ما هو المعنى المقصود لكل من ؟

raki'a רָקִיעַ جلد

shm'im שמים سماء

لنرى الآن كم مرة أستخدمت كلمة جَلَدٌ רָקִיעַ raki'a في سفر التكوين الأصحاح الأول لكى نبدأ بدراسة المعنى المقصود من هذه الكلمة، وردت هذه الكلمة 17 مرة فى العهد القديم وفيما يلى الشواهد التى وردت فيها هذه الكلمة

## أولاً فى سفر التكوين (1: 6-8 ، 20،17،15،14 ) وردت عدد 9 مرات

6" وَقَالَ اللهُ: «لِيَكُنْ جَلَدٌ فِي وَسَطِ الْمِيَاهِ. وَلْيَكُنْ فَاصِلاً بَيْنَ مِيَاهٍ وَمِيَاهٍ».

ויאמר אלהים יהי רקיע בתוך המים ויהי מבדיל בין מים למים

7 فَعَمِلَ اللهُ الْجَلَدَ، وَفَصَلَ بَيْنَ الْمِيَاهِ الَّتِي تَحْتَ الْجَلَدِ وَالْمِيَاهِ الَّتِي فَوْقَ الْجَلَدِ. وَكَانَ كَذلِكَ.

ויעשׂ אלהים את־הרקיע ויבדל בין המים אשר מתחת לרקיע ובין המים אשר מעל לרקיע ויהי־כן

8 وَدَعَا اللهُ الْجَلَدَ سَمَاءً. وَكَانَ مَسَاءٌ وَكَانَ صَبَاحٌ يَوْمًا ثَانِيًا. "

ויקרא אלהים לרקיע שׁמים ויהי־ערב ויהי־בקר יום שׁני

14 وَقَالَ اللهُ: «لِتَكُنْ أَنْوَارٌ فِي جَلَدِ السَّمَاءِ لِتَفْصِلَ بَيْنَ النَّهَارِ وَاللَّيْلِ، وَتَكُونَ لآيَاتٍ وَأَوْقَاتٍ وَأَيَّامٍ وَسِنِينٍ.

ויאמר אלהים יהי מארת ברקיע השמים להבדיל בין היום ובין הלילה והיו לאתת ולמועדים ולימים ושנים

15 وَتَكُونَ أَنْوَارًا فِي جَلَدِ السَّمَاءِ لِتُنِيرَ عَلَى الأَرْضِ». وَكَانَ كَذلِكَ.

והיו למאורת ברקיע השמים להאיר על־הארץ ויהי־כן

17 وَجَعَلَهَا اللهُ فِي جَلَدِ السَّمَاءِ لِتُنِيرَ عَلَى الأَرْضِ

ויתן אתם אלהים ברקיע השמים להאיר על־הארץ

20 وَقَالَ اللهُ: «لِتَفِضِ الْمِيَاهُ زَحَّافَاتٍ ذَاتَ نَفْسٍ حَيَّةٍ، وَلْيَطِرْ طَيْرٌ فَوْقَ الأَرْضِ عَلَى وَجْهِ جَلَدِ السَّمَاءِ».

ויאמר אלהים ישרצו המים שרץ נפש חיה ועוף יעופף על־הארץ על־פני רקיע השמים

### ثانياً فى سفر حزقيال (1: 22،23،25،26) وردت عدد 4 مرات

22 وَعَلَى رُؤُوسِ الْحَيَوَانَاتِ شِبْهُ مُقَبَّبٍ كَمَنْظَرِ الْبَلُّورِ الْهَائِلِ مُنْتَشِرًا عَلَى رُؤُوسِهَا مِنْ فَوْقُ.

ודמות על־ראשי החיה רקיע כעין הקרח הנורא נטוי על־ראשיהם מלמעלה

23 وَتَحْتَ الْمُقَبَّبِ أَجْنِحَتُهَا مُسْتَقِيمَةٌ الْوَاحِدُ نَحْوَ أَخِيهِ. لِكُلِّ وَاحِدٍ اثْنَانِ يُغَطِّيَانِ مِنْ هُنَا، وَلِكُلِّ وَاحِدٍ اثْنَانِ يُغَطِّيَانِ مِنْ هُنَاكَ أَجْسَامَهَا.

ותחת הרקיע כנפיהם ישרות אשה אל־אחותה לאיש שתים מכסות להנה ולאיש שתים מכסות להנה את גויתיהם

25 فَكَانَ صَوْتٌ مِنْ فَوْقِ الْمُقَبَّبِ الَّذِي عَلَى رُؤُوسِهَا. إِذَا وَقَفَتْ أَرْخَتْ أَجْنِحَتَهَا.

ויהי־קול מעל לרקיע אשר על־ראשם בעמדם תרפינה כנפיהן

26 وَفَوْقَ الْمُقَبَّبِ الَّذِي عَلَى رُؤُوسِهَا شِبْهُ عَرْشٍ كَمَنْظَرِ حَجَرِ الْعَقِيقِ الأَزْرَقِ، وَعَلَى شِبْهِ الْعَرْشِ شِبْهٌ كَمَنْظَرِ إِنْسَانٍ عَلَيْهِ مِنْ فَوْقُ.

וממעל לרקיע אשר על־ראשם כמראה אבן־ספיר דמות כסא ועל דמות הכסא דמות כמראה אדם עליו מלמעלה

### ثالثاً وردت هذه الكلمة مرة واحدة فى سفر دانيال (12:3)

3 وَالْفَاهِمُونَ يَضِيئُونَ كَضِيَاءِ الْجَلَدِ، وَالَّذِينَ رَدُّوا كَثِيرِينَ إِلَى الْبِرِّ كَالْكَوَاكِبِ إِلَى أَبَدِ الدُّهُورِ.

והמשכלים יזהרו כזהר הרקיע ומצדיקי הרבים ככוכבים לעולם ועד

### رابعاً وردت هذه الكلمة مرتان فى سفر المزامير ( 1:19 ، 1:150 )

1 اَلسَّمَاوَاتُ تُحَدِّثُ بِمَجْدِ اللهِ، وَالْفَلَكُ يُخْبِرُ بِعَمَلِ يَدَيْهِ.

השמים מספרים כבוד־אל ומעשה ידיו מגיד הרקיע

1 هَلِّلُويَا. سَبِّحُوا اللهَ فِي قُدْسِهِ. سَبِّحُوهُ فِي فَلَكِ قُوَّتِهِ.

הללו יה הללו־אל בקדשו הללוהו ברקיע עזו

ذ

1. وردت كلمة רקיע raki'a وكلمة שׁמים shm'im فى مزمور 1:19

> اَلسَّمَاوَاتُ הרקיע shm'im تُحَدِّثُ بِمَجْدِ اللهِ، وَالْفَلَكُ הרקיע raki'a يُخْبِرُ بِعَمَلِ يَدَيْهِ.

2. ورت كلمة shm'im بمعنى الكون كله أما كلمة raki'a الفضاء المحيط بالكرة الأرضية بما يحتويه من الكواكب والشمس
3. وردت كلمة shm'im 10 مرات فى تكوين 1 ( 1: 1،8،9،14،15،17،20،26،28)
4. وردت كلمة shm'im فى تكوين 1:1 بمعنى الكون ككل
5. فى تكوين 8:1 وَدَعَا اللهُ الْجَلَدَ raki'a سَمَاءً shm'im. وَكَانَ مَسَاءٌ وَكَانَ صَبَاحٌ يَوْمًا ثَانِيًا. كلمة shm'im هنا تعنى السماء المحدودة المحيطة بالكرة الأرضية هى المجموعة الشمسية
6. فى تكوين 9:1 تعنى كلمة shm'im هى الغلاف المحيط حيث عندما بدأ سديم كوكب الأرض يبرد ظهرت الكرة الأرضية وهذا سيتتم شرحه فى نظرية السديم وسيفهمه القارئ بتكملة قراءة البحث
7. فى تكوين 1: 14-15 تعنى كلمة shm'im بمعنى الكون كله الذى يضم المجموعة الشمسية والتى خلق الله فيها الشمس والقمر لضياء النهار والليل "14 وَقَالَ اللهُ: «لِتَكُنْ أَنْوَارٌ فِي جَلَدِ raki'a السَّمَاءِ shm'im لِتَفْصِلَ بَيْنَ النَّهَارِ وَاللَّيْلِ، وَتَكُونَ لآيَاتٍ وَأَوْقَاتٍ وَأَيَّامٍ وَسِنِينٍ. 15 وَتَكُونَ أَنْوَارًا فِي جَلَدِ raki'a السَّمَاءِ shm'im لِتُنِيرَ عَلَى الأَرْضِ». وَكَانَ كَذلِكَ. ... . 17 وَجَعَلَهَا اللهُ فِي جَلَدِ raki'a السَّمَاءِ shm'im لِتُنِيرَ عَلَى الأَرْضِ،" ونلاحظ هنا أن كلمة raki'a هى جزء من كل بمعنى أن كلمة raki'a جاءت بمعنى صريح يدل على المجموعة الشمسية والتى جزء من الكون والذى جاء بمعنى السماء shm'im
8. فى تكوين 1:20 "... وَلْيَطِرْ طَيْرٌ فَوْقَ الأَرْضِ عَلَى وَجْهِ על־פני *ʿal penê* جَلَدِ raki'a السَّمَاءِ shm'im " وردت raki'a لتعنى المجموعة الشمسية التى هى جزء من الكون shm'im وقد سبقت كلمة على وجه על־פני *ʿal penê* لتعنى أن الطيور تطير فى الغلاف المحيط بالأرض من raki'a
9. وردت كلمة عَلَى وَجْهِ על־פני *ʿal penê* أربعة مرات فى الأصحاح الأول من سفر التكوين

فى هذا البحث سنجد شرحاً علمياً لما سبق، وهذا الشرح مازال تنقصه الحقائق وذلك بسبب أن العلم لا يزال لم يصل إلى الحقائق الكاملة، فمنذ عشرون 20 سنة سابقة لم يكن العلم قادراً على شرح ما ورد فى هىذا البحث بسبب عدم وجود المراصد الفلكية المتطورة والموجودة الآن التى مكنت الفلكيين من رصد بعض الحقائق، وكذلك بعد خمسون 50 سنة سيتوصل العلم إلى معرفة المزيد من الحقائق

فهناك إجماع الآن على أن الماء الجزيئي تشكّل في معظمه على حبيبات غبار متناهية الصغر في المراحل الأولى لتكوّن النظام الشمس [1]، في مرحلة السحابة الجزيئية وما قبل النجوم، حيث بقي متجمداً على الغلاف الجليدي المحيط بالحبيبات. ومع مرور الوقت، تكتلت هذه الحبيبات ونمت، مُشكّلةً كواكب صخرية وكويكبات ومذنبات، وغيرها من الأجرام الصغيرة التي تُشكّل النظام الشمسي حالياً. ومع ذلك، عندما ارتفعت درجة حرارة القرص مع تكوّن الشمس، تسامي الماء من أسطح الحبيبات نحو الداخل إلى ما يُسمى بخط الثلج - جبهة تكثف الماء. تسبب هذا في استنزاف القرص الداخلي من الماء الذي لم يكن محتجزاً بالفعل في أجرام أكبر. وبالتالي، أشارت نماذج تكوّن النظام الشمسي القياسية إلى أن الأرض تراكمت من مادة القرص الداخلي الجافة، مما يعني أن مياهها لا بد أنها وصلت إليها من مصادر خارجية من مدار الأرض.

وقد تم اكتشاف بخار الماء في قرص تكوّن الكواكب حول نجم فتي، مما يكشف عن ظروف مواتية لتكوّن الكواكب وتأثيرات محتملة على تركيبها. وقد وجد الباحثون بخار الماء في القرص المحيط بنجم فتي[2]، تحديدًا في المنطقة التي يُحتمل أن تتشكل فيها الكواكب. يُعدّ الماء عنصرًا أساسيًا للحياة على الأرض، ويُعتقد أيضًا أنه يلعب دورًا هامًا في تكوّن الكواكب. مع ذلك، لم نتمكن حتى الآن من رسم خريطة لتوزيع الماء في قرص مستقر وبارد، وهو نوع القرص الذي يوفر الظروف الأمثل لتكوّن الكواكب حول النجوم. وقد أُتيحت هذه النتائج الجديدة بفضل Atacama Large Millimeter/submillimeter Array مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA)، التي يُعدّ المرصد الأوروبي الجنوبي (ESO) شريكًا فيها.

---

[1] ) Lise Boitard-Crépeau, Cecilia Ceccarelli, Pierre Beck, Lionel Vacher, and Piero Ugliengo, Was Earth's Water Acquired Locally during the Earliest Phases of the Solar System Formation?, The Astrophysical Journal Letters, 987:L25 (7pp), 2025 July 10, Published by the American Astronomical Society

[2] ) Resolved ALMA observations of water in the inner astronomical units of the HL Tau disk" by Stefano Facchini, Leonardo Testi, Elizabeth Humphreys, Mathieu Vander Donckt, Andrea Isella, Ramon Wrzosek, Alain Baudry, Malcom D. Gray, Anita M. S. Richards and Wouter Vlemmmings, 29 February 2024, Nature Astronomy

وكذلك يُعدّ جزيء الماء عنصرًا أساسيًا في تكوين الأنظمة الكوكبية، حيث يُمثّل خط تجمد الماء موقعًا مثاليًا لنموّ النوى الكوكبية الضخمة. نعرض هنا بيانات مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر للقرص الكوكبي الأولي الحلقي الذي يدور حول النجم الفتيّ HL Tauri، والتي تُظهر انبعاثًا ساطعًا مركزيًا ناتجًا عن ثلاثة انتقالات متميزة لنظير الماء الرئيسي ($H^{16}{}_2O$). يكشف محتوى الماء، المُحلّل مكانيًا وطيفيًا، عن الغاز في نطاق حراري يصل إلى درجة حرارة تسامي الماء. يُشير تحليلنا إلى حدّ أدنى صارم يبلغ 3.7 محيطات أرضية من بخار الماء المُتاح ضمن الوحدات الفلكية الداخلية السبعة عشر للنظام. نُبيّن أن مُلاحظاتنا تقتصر على استكشاف محتوى الماء في غلاف القرص الجوي، نظرًا لكثافة عمود الغبار العالية وامتصاصه، ونُشير إلى أن نظير الماء الرئيسي هو أفضل مُتتبّع لتحليل بخار الماء مكانيًا في الأقراص الكوكبية الأولية[1].

ما هو الأصل الحقيقي للماء؟ يتكون جزيء الماء من ذرة أكسجين واحدة وذرتين من الهيدروجين. نشأ الهيدروجين في الانفجار العظيم، بينما نشأ الأكسجين في لبّ النجوم التي تفوق كتلتها كتلة الشمس. وتوجد كميات هائلة من الماء، في حالته الغازية، في حاضنات النجوم الشاسعة في مجرتنا.

رصد تلسكوب هابل Hubble الفضائي سديم الحلزون Helix Nebula ووجد جزيئات الماء. يتحد الهيدروجين والأكسجين، اللذان يتشكلان عبر عمليات مختلفة، لتكوين جزيئات الماء في الغلاف الجوي المنبعث من هذا النجم المحتضر. إن أصول محيطاتنا تكمن في النجوم[2].



في الشكل سديم الحلزون Helix Nebula مثال على السدم الكوكبية، إذ يقع في مركزه نجم قزم أبيض. ورغم أنه يمثل نهاية نظام كوكبي، إلا أن غازات السديم ستغذي تكوين النجوم والكواكب في المستقبل. حقوق الصورة: ناسا، المرصد الوطني لعلم الفلك البصري، وكالة الفضاء الأوروبية، فريق سديم الحلزون التابع لتلسكوب هابل، م. ميكسنر (معهد علوم تلسكوب الفضاء)، وت. أ. ريكتور T.A. Rector (المرصد الوطني لعلم الفلك البصري NRAO).

NASA, NOAO, ESA, the Hubble Helix Nebula Team, M. Meixner (STScI), and T.A. Rector (NRAO)

---

[1] ) Stefano Facchini, Leonardo Testi, Elizabeth Humphreys, Mathieu Vander Donckt, Andrea Isella, Ramon Wrzosek, Alain Baudry, Malcom D. Gray, Anita M. S. Richards & Wouter Vlemmings, Resolved ALMA observations of water in the inner astronomical units of the HL Tau disk, Nature Astronomy volume 8, pages 587–595 (2024)

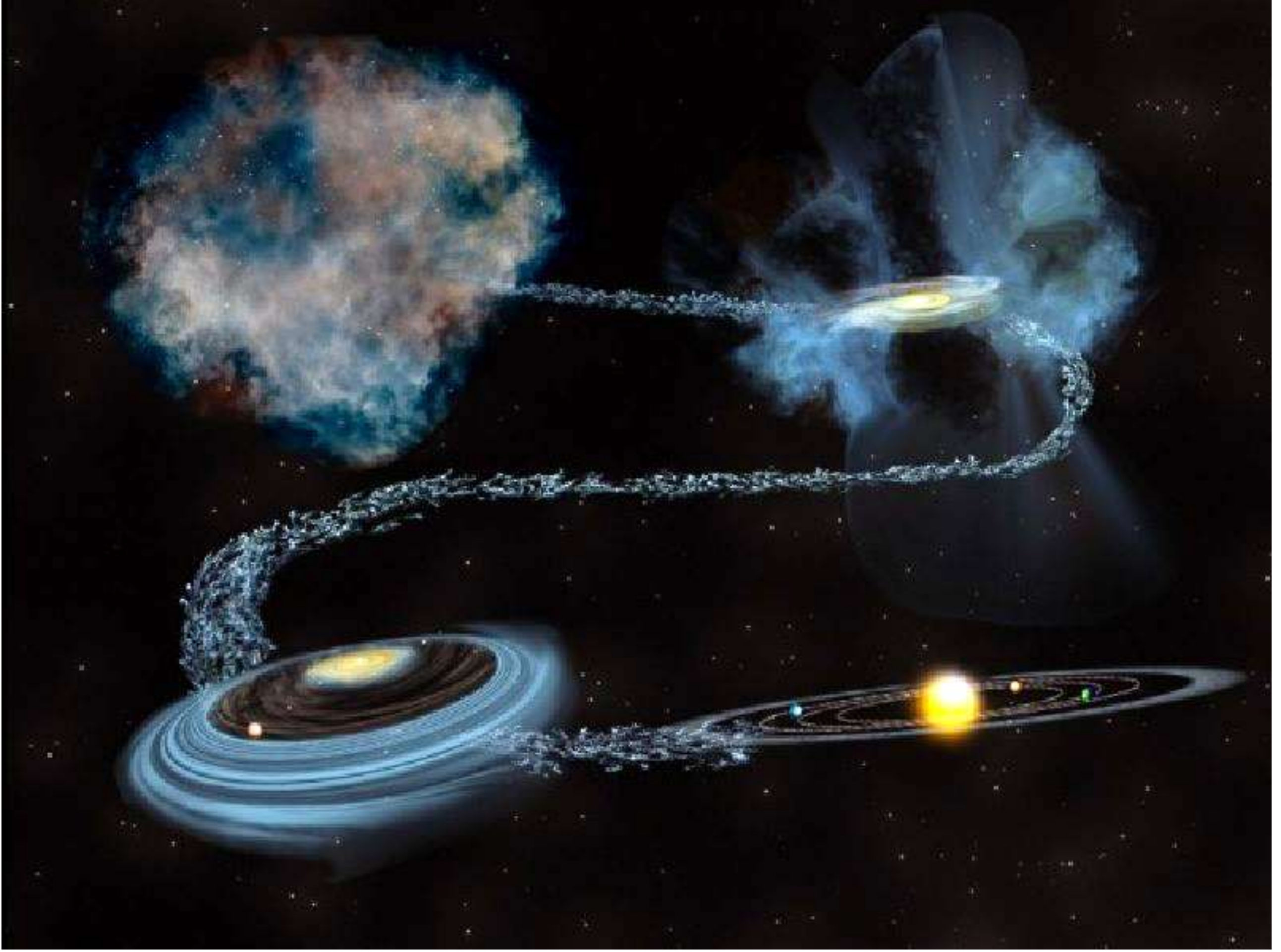
[2] ) https://science.nasa.gov/solar-system/ocean-worlds

توجد جزيئات الماء في سديم Orion ، ولا تزال تتشكل حتى اليوم. يتكون السديم في معظمه من غاز الهيدروجين، أما الجزيئات الأخرى فنادرة نسبيًا. ومع ذلك، فإن السديم شاسعٌ لدرجة أنه يُنتج يوميًا كمية من الماء تكفي لملء محيطات الأرض ستين مرة. يُصبح الماء، إلى جانب كل جزيء آخر يتشكل في هذه البيئات النجمية، مادةً خامًا لتكوين أنظمة كوكبية جديدة.



فى الشكل تُظهر هذه الصورة مركز سديم Orion كما رصده تلسكوب هابل الفضائي. يُعدّ هذا السديم منطقةً تشهد تكوّنًا كثيفًا للنجوم. حقوق الصورة: NASA, ESA, C.R. O'Dell (Rice University), and S.K. Wong (Rice University)

يُعدّ V883 Ori نجمًا أوليًا فريدًا من نوعه، إذ تبلغ درجة حرارته حدًا كافيًا لتحويل الماء في قرصه المحيط به إلى غاز، مما يُتيح لعلماء الفلك الراديوي تتبّع أصول هذا الماء. وقد وفّرت رصدات جديدة باستخدام مصفوفة أتاكاما Atacama الكبيرة (ALMA) أول تأكيد على أن الماء في نظامنا الشمسي قد يكون مصدره نفس مصدر الماء في الأقراص المحيطة بالنجوم الأولية في أماكن أخرى من الكون



صورة توضح مراحل التكوين من السديم حتى تكوين الكواكب

# فِي الْبَدْءِ خَلَقَ اللهُ السَّمَاوَاتِ وَالأَرْضَ

2 وَكَانَتِ الأَرْضُ خَرِبَةً وَخَالِيَةً، وَعَلَى وَجْهِ الْغَمْرِ ظُلْمَةٌ، وَرُوحُ اللهِ يَرِفُّ عَلَى وَجْهِ الْمِيَاهِ. 3 وَقَالَ اللهُ:
«لِيَكُنْ نُورٌ»، فَكَانَ نُورٌ. 4 وَرَأَى اللهُ النُّورَ أَنَّهُ حَسَنٌ. وَفَصَلَ اللهُ بَيْنَ النُّورِ وَالظُّلْمَةِ. 5 وَدَعَا اللهُ النُّورَ نَهَارًا،
وَالظُّلْمَةُ دَعَاهَا لَيْلاً. وَكَانَ مَسَاءٌ وَكَانَ صَبَاحٌ يَوْمًا وَاحِدًا. 5 [illegible] 9 [illegible]
[illegible] - 7 فَعَمِلَ اللهُ الْجَلَدَ، وَفَصَلَ بَيْنَ الْمِيَاهِ الَّتِي تَحْتَ الْجَلَدِ وَالْمِيَاهِ الَّتِي فَوْقَ الْجَلَدِ. وَكَانَ
كَذلِكَ. 8 وَدَعَا اللهُ الْجَلَدَ سَمَاءً. وَكَانَ مَسَاءٌ وَكَانَ صَبَاحٌ يَوْمًا ثَانِيًا.

المجموعة الشمسية يوجد بها عدة أحزمة ومنها حزام الكويكبات asteroid belt، و حزام كايبر Kuiper، وسحابة أورت Oort، وهذه المجموعات الثلاث غنية بالجليد والماء، وعلماء الفلك يعطون تأكيدات أن تلك الثلاث مجموعات كانت أقرب بكثير للنجم الشمسى في الماضى، وأن هذه الأجزمة كانت جزء من السديم في تكوين المجموعة الشمسية ثم أنفصلت عنها

أليس هذا يعطى تفسيراً للنص الوارد في الأصحاح الأول من سفر التكوين : فَعَمِلَ اللهُ الجْلَدَ، وَفَصَلَ بَيْنَ الْمِيَاهِ الَّتِي تحَتَ الجْلَدِ وَالْمِيَاهِ الَّتِي فَوْقَ الجْلَدِ ... ، فالسديم الأولى كان يتكون من الماء والجليد والغبار والأتربة، ثم تكاثف هذا السديم، ثم بدأت الكواكب في الإنفصال عنه، وهنا حدث الفصل بين المياه التي تحت الجلد والمياه التي فوق الجلد

أثبتت الأبحاث العلمية أن جميع الكواكب غنيه بالمياه، لذلك هناك عدة احتمالات بحسب ما توصل إليه العلم في الوقت الحال، وبالتأكيد في المستقبل سيكون هناك تفسيرات أكثر وأكثر

1. الجلد كمأ اوضحنا في الفصل السابق أنه المقصود به المجموعة الشمسة
2. المياه التي فوق الجلد هي سحابة أورت وهى كانت في الماضى أضعاف حجمها الآن وكانت جزء من السديم الأولى وأنفصلت عنه
3. المياه التي تحت الجلد هي المياه الموجودة في الكواكب، والمياه في حزام الكويكبات، والمياه في حزام كايبر

وهذا ما ستوضحه الأوراق التالية بهذا البحث

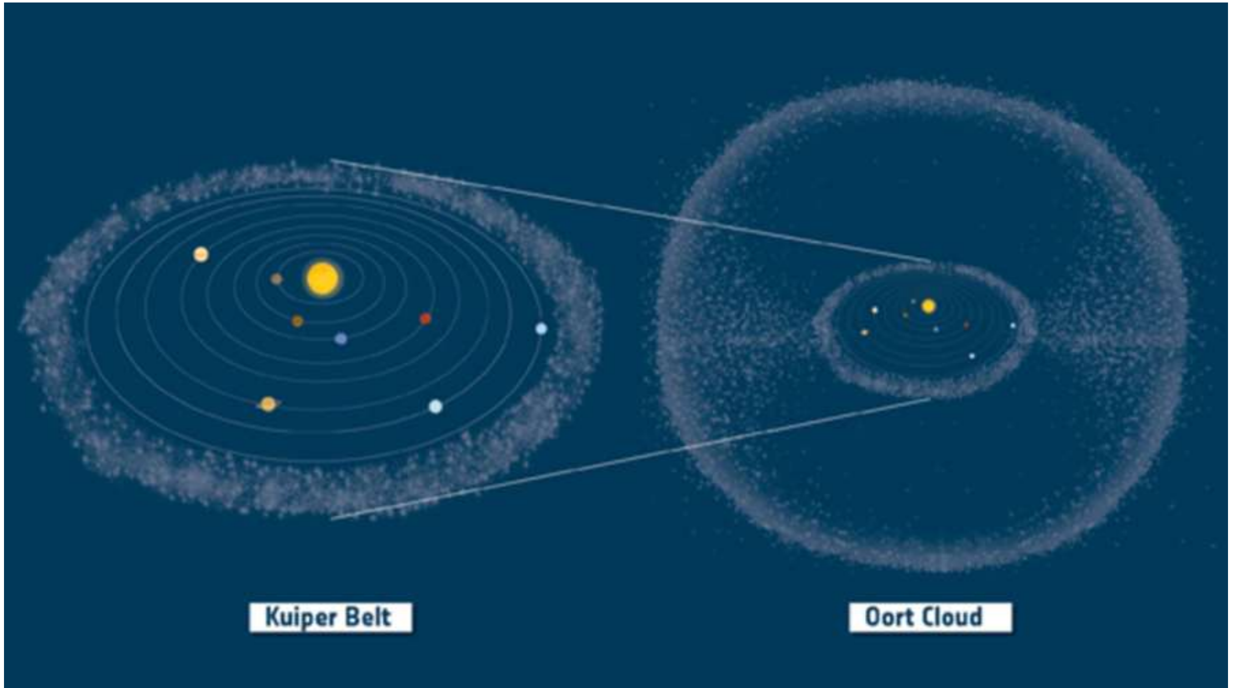
## سحابة أورت Oort

تُتيح الاكتشافات الحديثة لمذنبات سحابة أورت[1] النشطة والبعيدة، الواقعة خلف خط تبخر جليد الماء، فرصًا نادرة لدراسة النوى الساطعة ذات التطور المحدود في ظل ظروف انخفاض نشاط الغلاف الغازي مقارنةً بالمذنبات المرصودة على مسافات أصغر من مركز الشمس. تُعدّ الملاحظات المُوجّهة للمذنبات البعيدة غير المتفجرة، والتي يبلغ حجمها كيلومترات، جزءًا مهمًا من فهم خصائص جليد الماء المنطلق من سطح أو باطن النوى ذات التطور المحدود، مما يُسلط الضوء على خصائص الجليد في خزان سحابة أورت. أجريت ملاحظات طيفية بالأشعة تحت الحمراء القريبة لثلاثة مذنبات بعيدة هادئة ذات حجم نموذجي - C/2019 O3 و C/2019 E3 وC/2019 F2 - باستخدام وحدة المجال المتكامل (IFU) لمطياف الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIRSpec) على متن تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST). تقع جميع الأهداف عند نقطة الحضيض الشمسي على مسافة تتجاوز 8.8 وحدة فلكية، حيث تبلغ درجة حرارة الجسم الأسود المحلية حوالي 93 كلفن. عند هذه الدرجات المنخفضة، إذا وُجد جليد مائي غير متبلور في النواة، فقد لا يخضع أبدًا لعملية تبلور واسعة النطاق. كان هدفنا الرئيسي هو الكشف عن السمات المميزة للجليد المائي المتبلور وتوصيفها، ولا سيما نطاق الامتصاص عند 1.65 ميكرومتر وذروة انعكاس فرينل عند 3.1 ميكرومتر. كما بحثنا عن أنواع فائقة التطاير (أول أكسيد الكربون، ثاني أكسيد الكربون) ومركبات عضوية، بما في ذلك الميثانول، وسيانيد الهيدروجين، والهيدروكربونات العطرية والأليفاتية. النتائج والمناقشة: تكشف أطياف تلسكوب جيمس ويب الفضائي عن سمات امتصاص مميزة للجليد المائي في جميع المذنبات الثلاثة، إلى جانب انبعاثات فلورية من أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون. على الرغم من تشابه المسافات بين المذنبات والشمس، إلا أنها تُظهر تنوعًا ملحوظًا في كل من معدلات إنتاج المواد المتطايرة وخصائص سمات الجليد المائي، بما في ذلك الاختلافات في عمق النطاق والشكل الطيفي. بينما يُظهر المذنبان C/2019 O3 وC/2019 E3 شكلاً نموذجياً للغلاف الذري (ρ/1) يتوافق مع التدفق الخارجي المستقر، يُظهر المذنب C/2019 F2 شكلاً مختلفاً بشكل ملحوظ، مما يُشير إلى آلية قذف غير تقليدية أو تاريخ تطوري غير مألوف. نستكشف في هذه الدراسة تفسيرات محتملة لهذا التركيب غير المعتاد للغلاف الذري، ونناقش دلالاته على فهم محركات النشاط في المذنبات البعيدة. تُعزز هذه

[1] EPSC-DPS Joint Meeting 2025 (EPSC-DPS2025), held 7-12 September, 2025 in Helsinki ( https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2025/EPSC-DPS2025-721.html

النتائج معرفتنا بالحالة الفيزيائية لجليد الماء، وتُسهم في فهم أوسع لتطور المواد المتطايرة في أجرام النظام الشمسي الخارجي.

سحابة أورت، ركنٌ بعيدٌ وغامضٌ من الفضاء، هي مهد المذنبات ذات المدارات الطويلة. تقع في أطراف نظامنا الشمسي، وتمتد آلاف الوحدات الفلكية من الشمس. يحتوي هذا الخزان الهائل من الأجسام الجليدية على بقايا من تكوين نظامنا الشمسي، منذ أكثر من 4.6 مليار سنة. تُسمى هذه الأجسام بالأجسام المدارية المدارية (OCOs)، وتتكون من مواد متطايرة مثل الماء والميثان والأمونيا وثاني أكسيد الكربون. سحابة أورت محمية من قوى جاذبية الأجرام السماوية القريبة، فهي بمثابة حاجز يمنع الأجسام الجليدية من الانجراف أو الانجذاب إلى النظام الشمسي الداخلي. أحيانًا، قد تدفع اضطرابات ناتجة عن مرور النجوم أو تفاعلات الجاذبية الأجسام المدارية المدارية نحو الشمس. عندما تقترب من الشمس، تسخن وتطلق الغاز والغبار، مما يُشكل هالة متوهجة وذيلًا، وهما العلامتان المميزتان للمذنب. مذنب هالي مثالٌ رائعٌ على ذلك. لقد أسرت هذه الظاهرة البشر لقرون، إذ تعود سجلاتها إلى نصوص صينية قديمة منذ أكثر من ألفي عام. ويقترب مدارها من الأرض كل 76 عامًا، مما يجعلها واحدة من أشهر المذنبات المرتبطة بسحابة أورت.




حزام كايبر Kuiper وسحابة أورت Oort مصدر الصورة ESA

سحابة أورت[1] Oort هي أبعد منطقة في نظامنا الشمسي، وهي بعيدة بشكل مذهل، إذ تمتد من ربع المسافة إلى منتصف المسافة بين شمسنا وأقرب نجم. لتقدير المسافة إلى سحابة أورت، من المفيد التخلي عن الأميال والكيلومترات واستخدام الوحدة الفلكية (AU) بدلاً منها، وهي وحدة تُعرَّف بأنها المسافة بين الأرض والشمس، حيث تعادل الوحدة الفلكية الواحدة حوالي 93 مليون ميل أو 150 مليون كيلومتر.

عندما يغادر الضوء الشمس، يستغرق ما يزيد قليلاً عن ثماني دقائق للوصول إلى الأرض، ونحو أربع ساعات ونصف للوصول إلى مدار نبتون. وبعد أقل من ثلاث ساعات من عبور مدار نبتون، يعبر ضوء الشمس الحافة الخارجية لحزام كايبر. وبعد اثنتي عشرة ساعة أخرى، يصل ضوء الشمس إلى الغلاف الشمسي، حيث تصطدم الرياح الشمسية - وهي سيل من الجسيمات المشحونة المتدفقة بعيدًا عن الشمس بسرعة تقارب مليون ميل في الساعة (400 كيلومتر في الثانية) - بالوسط بين النجوم. وما وراء هذا الحد يقع الفضاء بين النجوم، حيث لا يؤثر المجال المغناطيسي للشمس. وبذلك يكون ضوء الشمس قد ابتعد عن الشمس لمدة سبع عشرة ساعة تقريبًا. وبعد أقل من يوم أرضي واحد من مغادرته الشمس، يكون ضوء الشمس قد قطع مسافة أبعد من أي مركبة فضائية من صنع الإنسان. ومع ذلك، بطريقة ما، سيستغرق الأمر من 10 إلى 28 يومًا أخرى قبل أن تصل أشعة الشمس نفسها إلى الحافة الداخلية لسحابة أورت، وربما يصل الأمر إلى عام ونصف قبل أن تتجاوز أشعة الشمس الحافة الخارجية لسحابة أورت.

تقول النظرية السائدة حول تكوين سحابة أورت إن هذه الأجسام الجليدية لم تكن دائمًا بعيدة جدًا عن الشمس. فبعد تكوّن الكواكب قبل 4.6 مليار سنة، احتوت المنطقة التي تشكّلت فيها على الكثير من بقايا الكويكبات. تكوّنت الكويكبات من نفس المادة التي تكوّنت منها الكواكب. ثمّ قامت جاذبية الكواكب (وخاصةً المشتري) بتشتيت الكويكبات في كل الاتجاهات. قُذفت بعض الكويكبات من النظام الشمسي تمامًا، بينما قُذفت أخرى إلى مدارات بيضاوية حيث بقيت تحت تأثير جاذبية الشمس، ولكنها كانت بعيدة بما يكفي لتتأثر أيضًا بقوى المجرة. ولعلّ أقوى هذه القوى كانت قوة المدّ والجزر من مجرتنا نفسها. باختصار، دفعت جاذبية الكواكب العديد من الكويكبات الجليدية بعيدًا عن الشمس، ومن المرجّح أن جاذبية المجرة تسبّبت في استقرارها على أطراف النظام الشمسي، حيث لم تعد الكواكب قادرة على التأثير عليها. وأصبحت هذه الأجسام

[1] ( https://science.nasa.gov/solar-system/oort-cloud/facts/

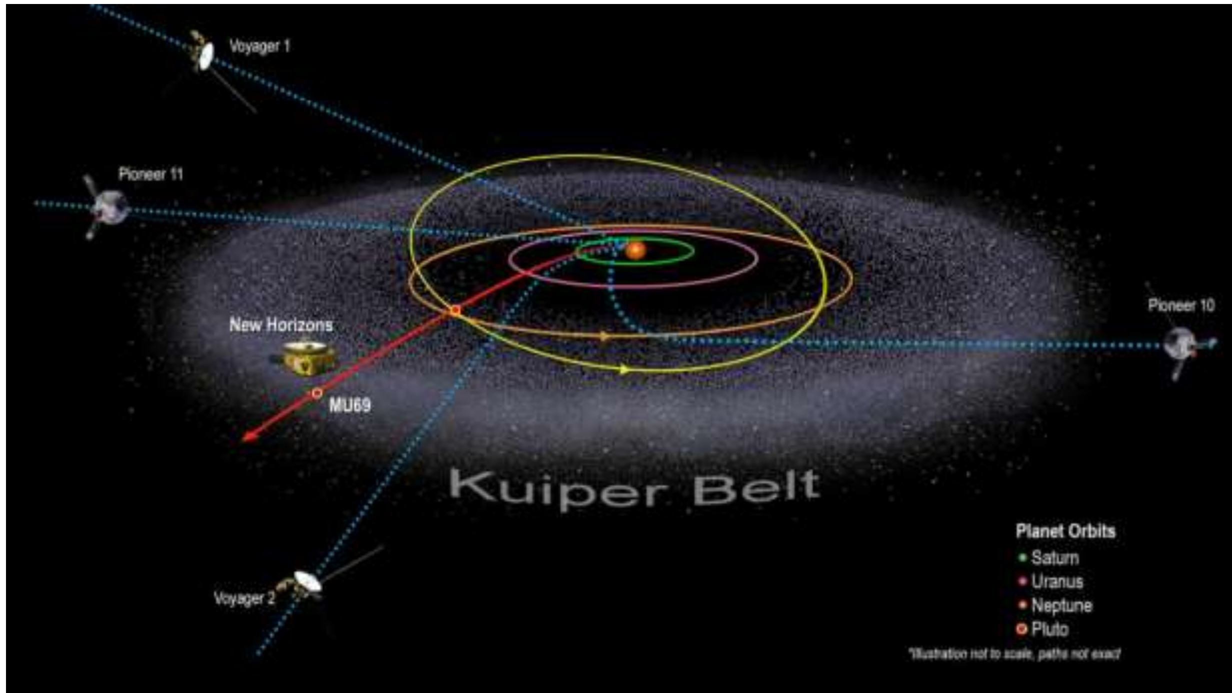
ما نسميه الآن سحابة أورت. مرة أخرى، هذه هي الفكرة الرئيسية، ولكن سحابة أورت قد تلتقط أيضاً أجساماً لم تتشكل في النظام الشمسي.

قد تحتوي سحابة أورت على مئات المليارات، بل ربما تريليونات، من الأجرام الجليدية. بين الحين والآخر، يُخلّ شيء ما بمدار أحد هذه العوالم الجليدية، فيبدأ سقوطه الطويل نحو شمسنا. ومن الأمثلة الحديثة على ذلك المذنبان (ISON) C/2012 S1 وC/2013 A1 سايدينغ سبرينغ. تفكك ISON عندما اقترب كثيرًا من الشمس. أما سايدينغ سبرينغ، الذي مرّ بالقرب من المريخ، فقد نجا من رحلته إلى النظام الشمسي الداخلي، لكنه لن يعود إلا بعد حوالي 740 ألف عام.

## حزام كايبر Kuiper

حزام كايبر Kuiper عبارة عن مجموعة من الأجرام الجليدية الصغيرة التي تدور حول الشمس على مسافة أبعد من نبتون. وهو يشبه إلى حد كبير حزام الكويكبات، ولكنه أبرد وأبعد عن الشمس.

تُسمى الأجرام الجليدية في حزام كايبر "أجرام حزام كايبر" (أعلم، اسم مبتكر)، أو اختصارًا KBOs. يُعد بلوتو أشهر هذه الأجرام، وأحد أسباب تصنيفه ككوكب هو اكتشاف آلاف الأجرام الأخرى التي تدور في نفس المنطقة. لم تُلتقط صور مقرّبة بواسطة مسبار فضائي سوى بلوتو وجرم آخر من أجرام حزام كايبر، وهو أروكوث Arrokoth. زار مسبار نيو هورايزونز Horizons probe بلوتو عام 2015، وأروكوث عام 2019. يتميز بلوتو بشكله الكروي، ويتكون من جبال من جليد الماء وأنهار جليدية من جليد النيتروجين، وله خمسة أقمار. أما أروكوث، فيبلغ قطره 30 كيلومترًا فقط، ولونه أحمر زاهٍ، وشكله يشبه رجل الثلج. جميع الأجرام الأخرى في حزام كايبر لم تتم دراستها إلا باستخدام التلسكوبات، وحتى أفضل التلسكوبات على الأرض وفي المدار لا تزال تراها كنقاط، لذلك لا نعرف الكثير عن أشكالها وألوانها مثل بلوتو وأروكوث.

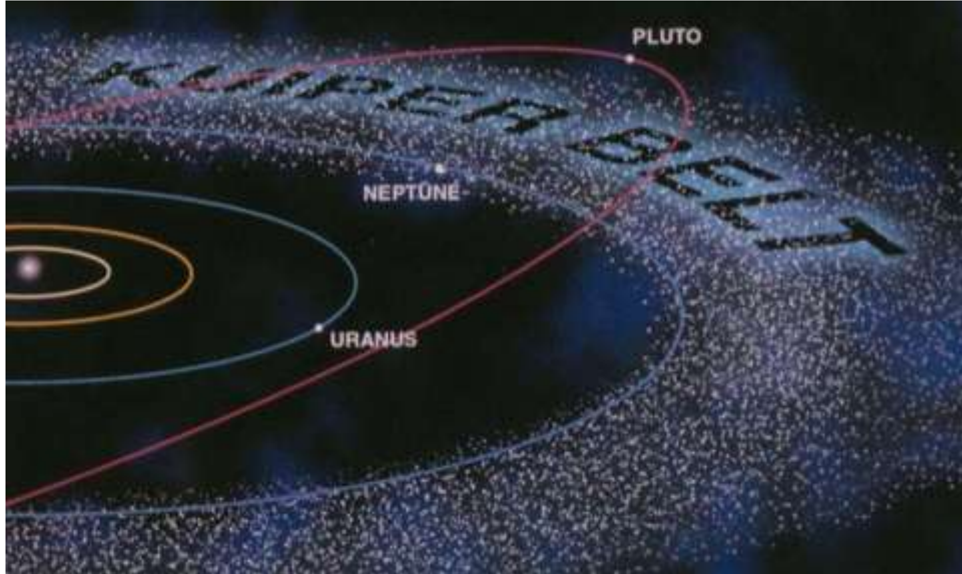



يظهر حزام كايبر خلف مدار نبتون (مصدر الصورة: NASA)

حزام كايبر[1] Kuiper Belt هو أحد أكبر التكوينات في نظامنا الشمسي، إلى جانب سحابة أورت والغلاف الشمسي والغلاف المغناطيسي لكوكب المشتري. يشبه شكله العام قرصًا منتفخًا أو حلقة. تبدأ حافته الداخلية عند مدار نبتون، على بُعد حوالي 30 وحدة فلكية من الشمس. (الوحدة الفلكية هي المسافة بين الأرض والشمس). تنتهي المنطقة الداخلية الرئيسية لحزام كايبر عند حوالي 50 وحدة فلكية من الشمس. تتداخل مع الحافة الخارجية للجزء الرئيسي من حزام كايبر منطقة ثانية تُسمى القرص المتناثر، والتي تمتد للخارج إلى ما يقرب من 1000 وحدة فلكية، مع وجود بعض الأجرام في مدارات تمتد إلى أبعد من ذلك.

يعتقد علماء الفلك أن الأجسام الجليدية في حزام كايبر هي بقايا من تكوين النظام الشمسي. ومثل العلاقة بين حزام الكويكبات الرئيسي وكوكب المشتري، تُعد هذه المنطقة من الأجسام التي ربما كانت ستتجمع لتشكل كوكبًا لولا وجود نبتون. ولكن جاذبية نبتون أثارت هذه المنطقة من الفضاء بشدة، ما حال دون اندماج الأجسام الجليدية الصغيرة لتكوين كوكب كبير.

حزام كايبر عبارة عن منطقة هائلة على شكل حلقة في الفضاء الخارجي للنظام الشمسي. ورغم وجود العديد من الأجرام الجليدية في هذه المنطقة، والتي تُعرف عمومًا باسم أجرام حزام كايبر (KBOs) أو الأجرام العابرة لنبتون (TNOs)، إلا أنها تتنوع بشكل كبير في الحجم والشكل واللون.



يبدأ الجزء الرئيسي من حزام كايبر من مدار نبتون NASA

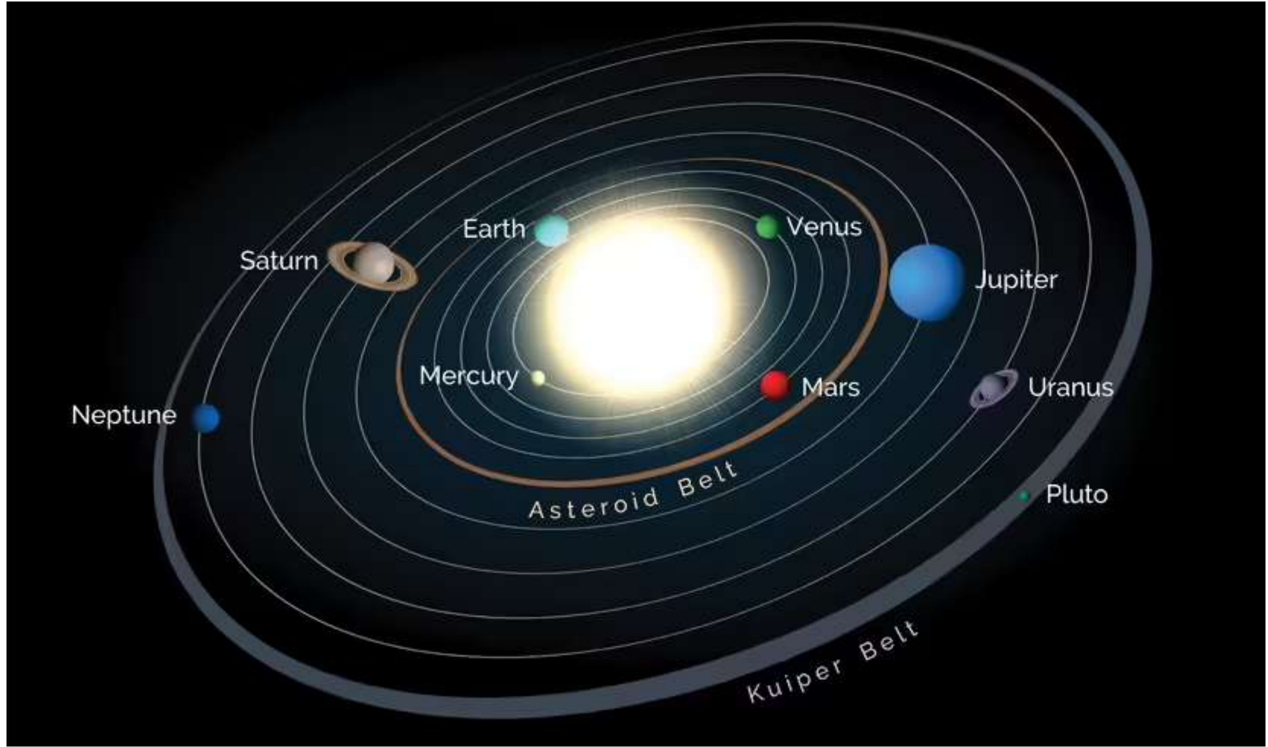
[1] ) /https://science.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/facts
/https://science.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/10-things-to-know-about-the-kuiper-belt

حزام كايبر منطقة شاسعة تقع في الأطراف الباردة لنظامنا الشمسي، خارج مدار نبتون. ويُطلق عليه أحيانًا اسم "المنطقة الثالثة" للنظام الشمسي. يعتقد علماء الفلك بوجود ملايين الأجسام الجليدية الصغيرة في هذه المنطقة، بما في ذلك مئات الآلاف التي يزيد عرضها عن 100 كيلومتر. بعض هذه الأجسام، مثل بلوتو، يزيد عرضها عن 1000 كيلومتر. بالإضافة إلى الصخور والجليد المائي، تحتوي الأجسام في حزام كايبر أيضًا على مجموعة متنوعة من المركبات المتجمدة الأخرى مثل الأمونيا والميثان.

يعتقد علماء الفلك أن الأجسام الجليدية في حزام كايبر هي بقايا من تكوين النظام الشمسي[1]. وكما هو الحال بين حزام الكويكبات الرئيسي وكوكب المشتري، فإن هذه المنطقة تضم أجسامًا كان من الممكن أن تتجمع لتشكل كوكبًا لولا وجود نبتون. ولكن جاذبية نبتون أثارت هذه المنطقة من الفضاء بشدة، ما حال دون اندماج الأجسام الجليدية الصغيرة فيها لتكوين كوكب كبير. قد لا تمثل كمية المواد الموجودة في حزام كايبر اليوم سوى جزء ضئيل مما كانت عليه في الأصل. ووفقًا لإحدى النظريات المدعومة جيدًا، فإن تغير مدارات الكواكب العملاقة الأربعة (المشتري، زحل، أورانوس، ونبتون) ربما يكون قد تسبب في فقدان معظم المواد الأصلية - والتي يُرجح أن تكون كتلتها من 7 إلى 10 أضعاف كتلة الأرض.

تتلخص الفكرة الأساسية في أنه في المراحل المبكرة من تاريخ النظام الشمسي، اضطر كوكبا أورانوس ونبتون إلى الدوران بعيدًا عن الشمس بسبب تغيرات في مداري كوكبي المشتري وزحل. ومع ابتعاد أورانوس ونبتون عن الشمس، مرا عبر القرص الكثيف من الأجسام الجليدية الصغيرة المتبقية بعد تشكل الكواكب العملاقة. كان مدار نبتون هو الأبعد، وقد أدت جاذبيته إلى انحناء مسارات عدد لا يحصى من الأجسام الجليدية نحو الداخل باتجاه الكواكب العملاقة الأخرى. وفي نهاية المطاف، قذف المشتري معظم هذه الأجسام الجليدية إما إلى مدارات بعيدة للغاية (لتشكيل سحابة أورت) أو خارج النظام الشمسي تمامًا. ومع قذف نبتون للأجسام الجليدية باتجاه الشمس، تسبب ذلك في ابتعاد مداره أكثر، وأجبر تأثير جاذبيته الأجسام الجليدية المتبقية على التواجد في نطاق المواقع التي نجدها فيها في حزام كايبر. اليوم، يتآكل حزام كايبر ببطء. وتصطدم الأجسام المتبقية فيه من حين لآخر، مما ينتج عنه أجسام أصغر حجماً متفتتة بفعل الاصطدام، وأحياناً مذنبات، بالإضافة إلى غبار تقذفه الرياح الشمسية خارج النظام الشمسي.

[1] ( https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/in-depth.amp




حزام كايبر[1] عبارة عن بنية قرصية الشكل تتكون من أجسام صلبة تدور حول الشمس خلف نبتون. وهو مصدر المذنبات قصيرة الدورة، والمُرجّح أنه مستودع المواد البدائية في النظام الشمسي. تتميز درجات حرارة سطح الحزام بانخفاضها (حوالي 50 كلفن)، مما يشير إلى أن الجليد الذي حُبس أثناء تكوينه قد حُفظ على مدار عمر النظام الشمسي. لسوء الحظ، فإن معظم أجسام حزام كايبر خافتة للغاية بحيث لا تسمح بإجراء دراسات تركيبية ذات مغزى، حتى باستخدام أكبر التلسكوبات المتاحة. وقد تم رصد جليد الماء في عدد قليل من الأجسام، لكن معظمها يبدو بلا ملامح طيفية مميزة. هنا، نقدم رصدًا بالأشعة تحت الحمراء القريبة لجسم حزام كايبر الكبير (50000) كواوار، والذي يكشف عن وجود جليد الماء البلوري وهيدرات الأمونيا. تشير البلورية إلى أن الجليد قد سُخّن إلى 110 كلفن على الأقل. من المتوقع أن يتحلل كل من هيدرات الأمونيا وجليد الماء البلوري بفعل الإشعاع الجسيمي عالي الطاقة خلال فترة زمنية تقارب 107 سنوات. نستنتج أن كواوار قد أُعيد تشكيل سطحه مؤخرًا، إما عن طريق اصطدام جليد كان مدفونًا (محميًا) سابقًا، أو عن طريق انبعاث غازات بركانية جليدية، أو عن طريق مزيج من هاتين العمليتين.

[1] David C. Jewitt & Jane Luu, Crystalline water ice on the Kuiper belt object (50000) Quaoar, Nature volume 432, (2004) pages 731–733

تم دراسة مجموعة كبيرة من أطياف الأشعة تحت الحمراء القريبة منخفضة الدقة لأجرام حزام كايبر[1] (KBOs) والقنطورات centaurs في محاولة لفهم وجود جليد الماء في حزام كايبر. نجد أن جليد الماء على سطح هذه الأجرام يظهر بثلاث طرق منفصلة: (1) تُظهر أفراد عائلة هاوميا Haumea بشكل فريد أسطحًا من جليد الماء النقي تقريبًا، ويُفترض أن ذلك نتيجة لتفتت الغلاف الجليدي لجرم هاوميا أولي متمايز أكبر حجمًا؛ (2) الأجرام الكبيرة ذات القدر المطلق H < 3 (وعدد محدود يصل إلى H = 4.5) لها أغطية سطحية من جليد الماء - ربما مختلطة بالأمونيا - والتي يبدو أنها مرتبطة بنشاط بركاني جليدي قديم محتمل على هذه الأجرام الكبيرة؛ (3) يبدو أن الأجسام الصغيرة في حزام كايبر والقنطورات، التي لا تنتمي إلى عائلة هاوميا ولا إلى أحزمة كايبر الكلاسيكية الباردة، تنقسم إلى عائلتين (نشير إليهما بـ"المحايدة" و"الحمراء")، كل منهما عبارة عن مزيج من مكون مشترك شبه محايد ومكون إما أحمر قليلاً أو أحمر جداً، ويشمل أيضاً جليد الماء. ويدعم نموذجٌ يشير إلى أن الاختلاف بين الأجسام المحايدة والحمراء يعود إلى تكوّنها في نظام شمسي مضغوط مبكر، إما داخل أو خارج خط تبخر الميثانول عند حوالي 20 وحدة فلكية، ملاحظةَ أن الميثانول لا يُرصد إلا على الأجسام الأكثر احمراراً، وهي تلك التي يُتوقع أن تحتوي على أكبر كمية من المزيج المحتوي على الميثانول.

يُظهر التحليل الطيفي والضوئي أن جليد الماء في حزام كايبر يتكون عبر ثلاث عمليات منفصلة ومتميزة. يُلاحظ وجود جليد ماء نقي تقريبًا فقط على هاوميا وعلى مجموعة أجسامها الناتجة عن التصادم (وأقمارها)، ولا بد أن يكون مرتبطًا بالاصطدام الذي أدى إلى تكوين هذه المجموعة. تشير الأحجام الصغيرة لأفراد هذه المجموعة، إلى جانب الكثافة المنخفضة لأقمار هاوميا، إلى أن هذه الأجسام غير متمايزة وتتكون بالكامل تقريبًا من جليد ماء نقي. يمكن أن تتشكل أسطح جليد الماء النقي هذه إذا كانت مجموعة الأجسام الناتجة عن التصادم عبارة عن شظايا من وشاح جليدي نقي تقريبًا في هاوميا أولية متمايزة في مراحلها المبكرة. لم يتم تحديد شظايا من قشرة هاوميا الأولية، والتي من المفترض أن تُظهر سطحًا داكنًا مُشعًا بالهيدروكربونات، ولكنها قد تكون موجودة. مع ذلك، ستكون شظايا القشرة نادرة مقارنةً بشظايا الوشاح.

[1] M. E. Brown, E. L. Schaller, and W. C. Fraser, WATER ICE IN THE KUIPER BELT, The Astronomical Journal, Volume 143, Number 6, 2012

## قد يكون أروكوث Arrokoth وأجرام أخرى في حزام كويبر مليئة بالجليد القديم

قد يُساعد نموذج جديد لتطور المذنبات[1] وبنيتها الداخلية في تفسير السلوك الانفجاري لمذنبات "القنابل الجليدية" أثناء مرورها بالقرب من الشمس. قد يكون لجسم حزام كايبر المسمى "486958 أروكوث"، أو ببساطة "أروكوث"، قواسم مشتركة مع رجل الثلج تتجاوز مجرد الشكل. تشير أبحاث جديدة إلى وجود جليد قديم محبوس داخل قلبه المتجمد.

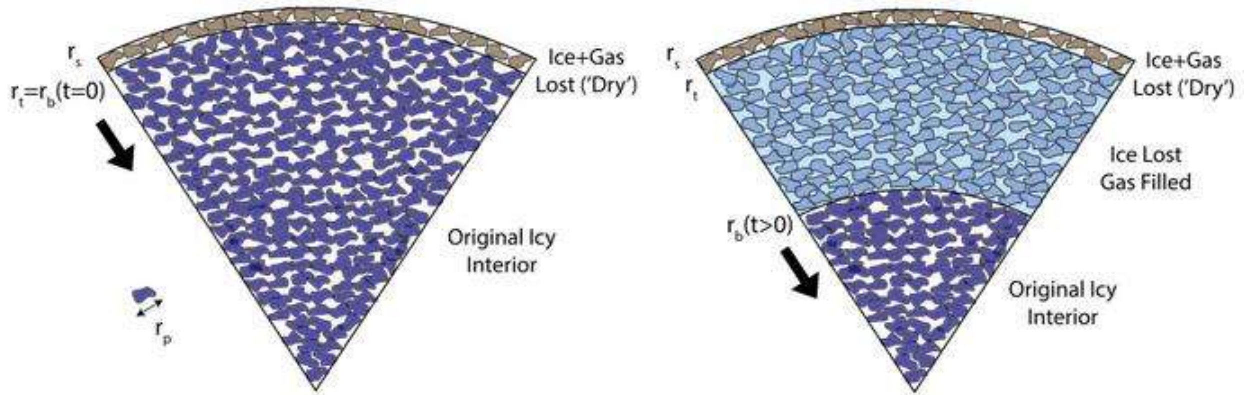
يعتبر فريق البحث هذا "رجل الثلج الفضائي"، المعروف أيضًا باسم ألتيما ثولي Ultima Thule ، دراسة حالة لأجرام أخرى داخل حزام كايبر. يُمثل هذا الحزام حلقة جليدية من الأجسام المذنبة الموجودة خارج مدار نبتون في المناطق الخارجية لنظامنا الشمسي. وبالتالي، يُشير اكتشاف أروكوث إلى أن هذه الأجسام، وهي بقايا مواد كانت موجودة أثناء تكوين الكواكب قبل 4.5 مليار سنة، قد لا تزال تحتفظ بمحتواها الجليدي الأصلي. يُشار إلى هذه الجليديات أيضًا باسم "المواد المتطايرة" نظرًا لسرعة تبخرها.

تُشكّل هذه النتائج تحديًا لنماذج تطور أجرام حزام كايبر السابقة، التي عجزت عن تفسير مصير المواد المتطايرة الجليدية في هذه الأجرام الباردة والبعيدة. وقد استندت هذه النماذج إلى افتراضات ربما قللت من تقدير المدة التي يمكن أن تحتفظ فيها أجرام حزام كايبر بالمواد المتطايرة عمومًا، ولا سيما أول أكسيد الكربون والماء. وكما هو الحال مع تسرب الغاز من الصخور المسامية على الأرض، يفترض الفريق البحثي أن أجرام حزام كايبر، مثل أروكوث، تخضع للعملية نفسها مع جليدها. ومع ذلك، يعتقد الفريق أن أجرام حزام كايبر قادرة على الاحتفاظ بجليدها المتطاير لمليارات السنين من خلال تكوين غلاف جوي تحت السطح يُبطئ من فقدان الجليد.

وقال أوركان أومورهان Orkan Umurhan، القائد المشارك للفريق وكبير الباحثين في معهد SETI، في بيان: "يكمن جوهر الأمر في أننا صححنا خطأً فادحًا في النموذج الفيزيائي الذي كان يُفترض استخدامه لعقود طويلة لهذه الأجرام الباردة والقديمة جدًا. قد تكون هذه الدراسة بمثابة الشرارة الأولى لإعادة تقييم نظرية تطور ونشاط باطن المذنبات."

[1] ( https://www.space.com/arrokoth-space-snowman-kuiper-belt-ice-objects
Samuel P.D. Birch, Orkan M. Umurhan, Retention of CO ice and gas within 486958 Arrokoth, Icarus, Volume 413, 1 May 2024

في سياق إعادة تقييم التركيب الداخلي لأجرام حزام كايبر، قد تُفسر نظرية الفريق سبب تحول بعض هذه الأجرام إلى "قنابل جليدية"، تُظهر سلوكًا انفجاريًا عند اقترابها من الشمس. كما قد تُغير فهمنا للمذنبات عمومًا، وتُساعد في تفسير الانفجارات الشديدة التي رصدناها مع المذنب 29P/Schwassmann-Wachmann أثناء مروره عبر النظام الشمسي الداخلي. يشير نموذج الفريق إلى أن مذنب أروكوث يتكون من مزيج من أول أكسيد الكربون وجليد الماء. ومع مرور المذنب بالقرب من الشمس، ترتفع درجة حرارة سطحه، مما يؤدي إلى فقدانه الجليد والغاز عبر التسامي. التسامي هو تحول المادة الصلبة مباشرةً إلى غاز، متجاوزًا الحالة السائلة. ومع مرور الوقت، تتجه جبهة التسامي هذه نزولًا عبر جليد أول أكسيد الكربون المحفوظ داخل ما يُعرف بمصفوفة جليد الماء. يبدأ جليد أول أكسيد الكربون المحبوس أيضًا في التسامي - ولكن بدلاً من أن يهرب هذا الجليد، فإنه سيتحرك لأعلى ويملأ المسام في الطبقات العليا من أروكوث المحاكاة. يُوضح الفريق أن هذا سيُنشئ غلافًا جويًا داخل جسم مذنب أروكوث، مما يمنع المزيد من الغاز من التسرب. سيُحدث مذنبٌ ذو غلاف جوي تحت سطحي كهذا انفجارًا عنيفًا عندما يمر مرة أخرى بالقرب من الشمس ويفقد المزيد من المادة السطحية، مما يسمح للغاز المتراكم بالهروب بسرعة.




رسم تخطيطي لكوكب أروكوث يوضح عملية التسامي التي تتحرك نحو الأسفل وتملأ الطبقات العليا بالغاز.
(مصدر الصورة: معهد SETI)

## جليد الماء على قمر تابع لجسم حزام كايبر 2003 EL61

تم الحصول على طيف الأشعة تحت الحمراء القريبة لألمع قمر تابع لجسم حزام كايبر[1] الكبير $EL_{61}$ 2003. يحتوي الطيف على خصائص امتصاص عند 1.5 و2.0 ميكرومتر، مما يشير إلى وجود جليد مائي على سطحه. وجدنا أن خطوط امتصاص القمر أعمق بكثير من خصائص الجليد المائي الموجودة عادةً على أجرام حزام كايبر. نستنتج أن هذا الطيف غير المألوف يشير إلى أن القمر قد تشكل على الأرجح نتيجة اصطدام وليس نتيجة التقاط.

يُعدّ التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء القريبة طريقةً مثاليةً لدراسة التركيب السطحي لأجسام حزام كايبر عن بُعد. فالعديد من الأنواع الوفيرة في النظام الشمسي الخارجي، بما في ذلك جليد الميثان وثاني أكسيد الكربون والماء، تُظهر خصائص امتصاص في نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة. ويُهيمن الميثان على أطياف بلوتو وغيره من الأجسام الكبيرة في حزام كايبر. وقد رُصدت كمية ضئيلة من جليد الماء على عدد من هذه الأجسام، كما تُظهر بعضها أدلةً على وجود أنواع أخرى من الجليد. ويُظهر شارون، وهو القمر التابع الوحيد الآخر في حزام كايبر الذي نُشر طيفه، خصائص قوية ناتجة عن امتصاص جليد الماء البلوري. وقد تُسهم أطياف الأقمار في إلقاء الضوء على أصلها. فعلى وجه التحديد، من المرجح أن يكون للأجسام التي تم التقاطها أطياف مشابهة لأطياف الأجسام الأخرى في حزام كايبر، ولكن الأقمار التي تشكلت من آليات أخرى قد تُظهر تركيبات سطحية غير عادية أو مُعدّلة.

تتميز خصائص الامتصاص في طيف القمر الصناعي بعمق أكبر بكثير من خصائص جليد الماء التي تُلاحظ عادةً في أجرام حزام كايبر. تبلغ نسبة التدفق عند 1.7 ميكرومتر إلى التدفق عند 2.0 ميكرومتر حوالي 80%. معظم أجرام حزام كايبر التي تحتوي على خصائص جليد الماء يكون عمقها أقل من 20% تقريبًا، وتُوجد أعمق مناطق الامتصاص (حوالي 60%) في 2003 EL61، وشارون، و1996 TO66. وبناءً على ذلك، يبدو القمر الصناعي الأكثر سطوعًا لـ 2003 EL61 جسمًا غير عادي في حزام كايبر. من المرجح أن تُشبه الأجسام التي تم أسرها المجموعة الأصلية التي تشكلت فيها؛ لذا، يُشير طيف القمر الصناعي إلى أن تشكله عن طريق الأسر أمر غير مرجح.

---

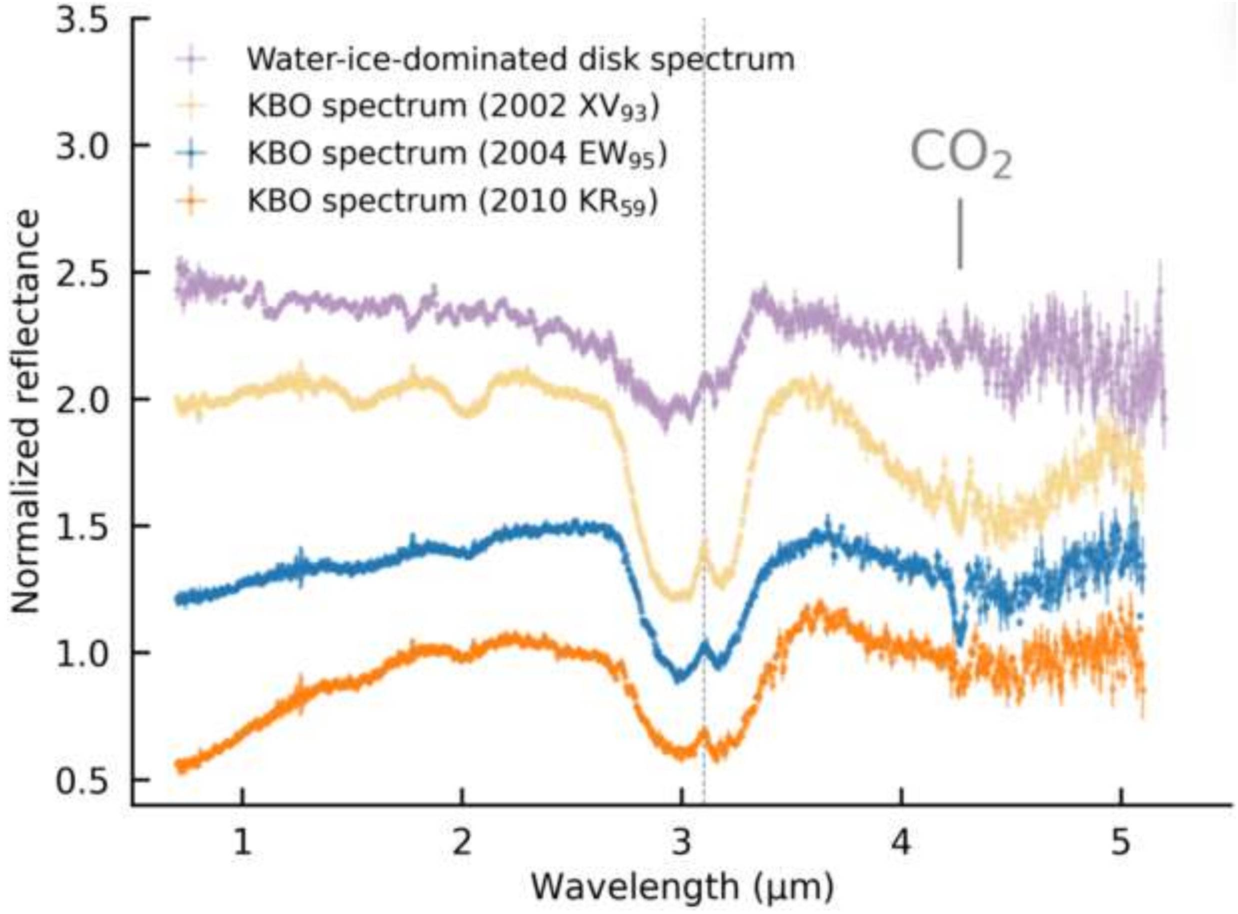
[1] K. M Barkume , M. E. Brown , and E. L. Schaller, Water Ice on the Satellite of Kuiper Belt Object 2003 EL61, The Astrophysical Journal, Volume 640, Number 1

## جليد الماء في قرص الحطام المحيط بـ HD 181327 في حزام كايبر

أقراص الحطام هي أنظمة كوكبية خارجية تحتوي على كواكب وأجرام صغيرة (كويكبات، وأجسام حزام كايبر، ومذنبات، وما إلى ذلك) وغبار حطام بحجم الميكرومتر[1]. ولأن جليد الماء هو أكثر المواد المتطايرة المتجمدة شيوعًا، فإنه يلعب دورًا أساسيًا في تكوين الكواكب والأجرام الصغيرة. على الرغم من شيوع وجود جليد الماء في أجسام حزام كايبر والمذنبات في النظام الشمسي، تم اكتشاف جليد الماء في قرص الحطام HD 181327 باستخدام مطياف الأشعة تحت الحمراء القريبة الموجود على متن تلسكوب جيمس ويب الفضائي. تم رصد خاصية امتصاص واسعة النطاق لجليد الماء في الحالة الصلبة عند 3 ميكرومتر، بما في ذلك ذروة فرينل Fresnel peak واضحة عند 3.1 ميكرومتر، مما يدل على وجود جزيئات جليد ماء بلورية كبيرة. تكشف تدرجات خاصية جليد الماء كدالة للمسافة النجمية المركزية عن بيئة ديناميكية يتم فيها تدمير جليد الماء وإعادة تكوينه. قدّرت نسبة كتلة الجليد المائي بين 0.1% عند مسافة 85 وحدة فلكية تقريبًا و21% عند مسافة 113 وحدة فلكية تقريبًا، مما يشير إلى وجود خزان من الجليد المائي في قرص HD 181327 خارج خط التجمد. ومن المرجح أن تكون الأجسام الجليدية التي تُطلق الجليد المائي في HD 181327 هي النظائر الخارجية لأجسام حزام كايبر الغنية بالجليد المائي في نظامنا الشمسي.

قد تكون هذه العملية نفسها هي ما حدث في النظام الشمسي الفتيّ أثناء تشكّل الكواكب الثمانية. في الواقع، قارن الباحثون أطياف الانعكاس الخاصة بهم مباشرةً مع أجرام حزام كايبر، وكانت أوجه التشابه لافتةً للنظر! توجد اختلافات طفيفة، مثل اختلاف عمق جليد الماء عند 3 ميكرومتر، ربما بسبب رصد أحجام حبيبات جليد الماء أكبر من المتوسط في النظام الشمسي، لكن هذا دليل واضح على أن حزام كايبر في النظام الشمسي ليس فريدًا من نوعه. يُعدّ اكتشاف جليد الماء في نظام نجمي آخر خطوةً هائلةً نحو فهم أصول الحياة على الأرض، وسيساعد في تطوير نماذج قد تُخبرنا من أين أتت محيطات الأرض.

[1] C. Xie, C. H. Chen, C. M. Lisse, D. C. Hines, T. Beck, S. K. Betti, N. Pinilla-Alonso, C. Ingebretsen, K. Worthen, A. Gáspár, S. G. Wolff, B. T. Bolin, L. Pueyo, M. D. Perrin, J. A. Stansberry, and J. M. Leisenring, Water Ice in the Exo-Kuiper Belt Around HD 181327, Nature volume 641, pages 608–611 (2025)




مقارنة أطياف انعكاس جليد الماء في HD 181327 (باللون الأرجواني، في الأعلى) مع أطياف أجسام حزام كايبر. تشترك جميعها في "حوض" امتصاص الماء المميز وذروة فرينل Fresnel Peakعند الخط المتقطع الرأسي، مما يُظهر تشابهًا بين HD 181327 والنظام الشمسي. كما يوجد بعض التشابه في خصائص ثاني أكسيد الكربون المحتملة

## التعريف بـ حزام الكويكبات asteroid belt

يُعرَّف حزام الكويكبات بأنه منطقة تقع بين المريخ والمشتري، وتحتوي على العديد من الأجرام الكوكبية الصغيرة، التي تتكون أساسًا من مواد مختلفة، وكتلتها الإجمالية أقل بكثير من كتلة القمر. معظم الكويكبات في هذا الحزام يقل قطرها عن 100 كيلومتر، وتُظهر ترتيبًا نطاقيًا بناءً على تركيبها الكيميائي[1].

لا يحتوي حزام الكويكبات حاليًا إلا على كمية من المواد تكفي لتكوين كوكب أصغر من الأرض بألفي مرة، على الرغم من اتساعه الهائل. ويبدو من المرجح أن هذه المنطقة كانت تحتوي في الماضي على كتلة أكبر بكثير مما هي عليه اليوم. وبتقدير كمية المواد الصلبة اللازمة لتكوين الكواكب الداخلية والكواكب الغازية العملاقة، يُقدّر حجم حزام الكويكبات بحوالي ضعف كتلة الأرض. وحتى لو فُقدت معظم هذه الكتلة في مرحلة مبكرة، فلا بد أن كثافة المواد الصلبة على سطحه كانت أعلى بمئة مرة على الأقل مما هي عليه اليوم، وذلك لتكوين أجسام بحجم سيريس وفيستا (قطرهما حوالي 900 و500 كيلومتر على التوالي) في غضون بضعة ملايين من السنين فقط.

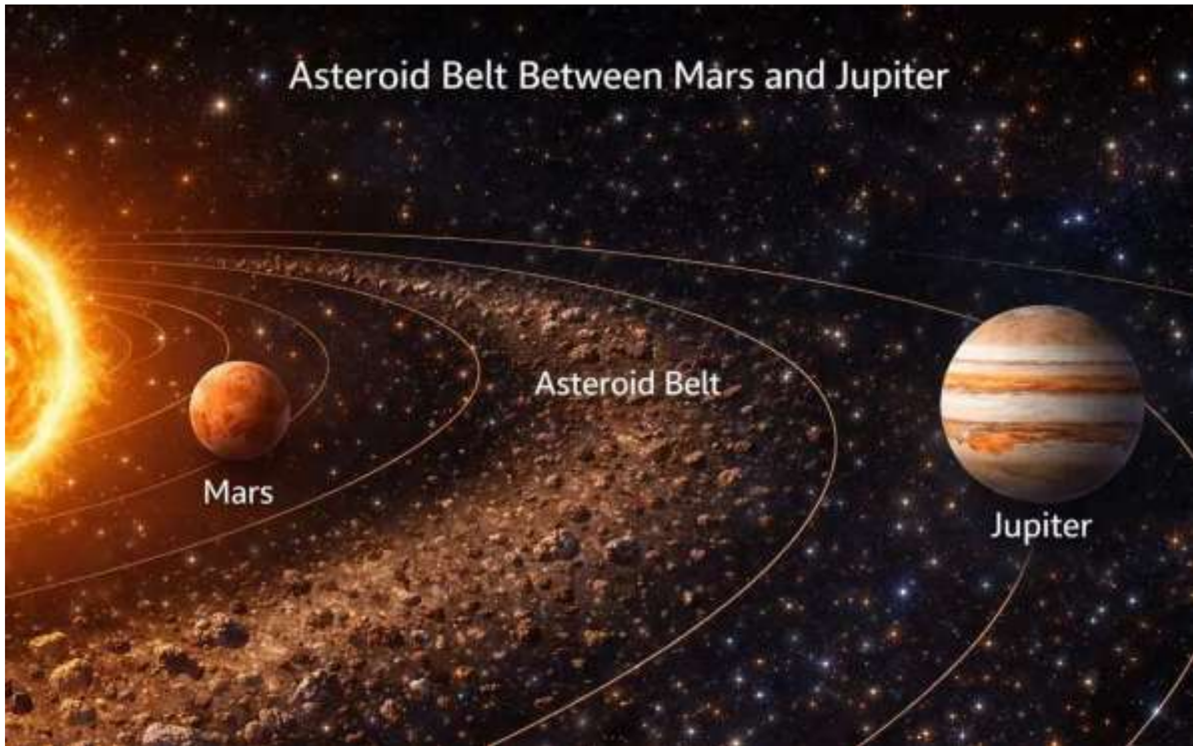
تحتوي عدة مناطق من حزام الكويكبات على تجمعات من الكويكبات ذات مدارات وخصائص طيفية متشابهة، مما يشير إلى أنها مصنوعة من نفس المادة. هذه التجمعات هي شظايا ناتجة عن تصادم كويكبات أكبر حجمًا. يوجد عدد قليل نسبيًا من هذه التجمعات، مما يعني أن التصادمات الكارثية نادرة الحدوث. يشير هذا إلى أن حزام الكويكبات احتوى على كتلة قليلة نسبيًا طوال معظم تاريخه. يُظهر طيف الكويكب فيستا، الواقع على بُعد 2.4 وحدة فلكية من الشمس، أن قشرته بازلتية. وتُظهر نيازك HED، التي يُحتمل أنها قادمة من فيستا، أن هذه القشرة تشكلت بعد بضعة ملايين من السنين فقط من تكوّن النظام الشمسي، وفقًا لعدة أنظمة نظائرية. ويُشير بقاء قشرة فيستا إلى أن معدل الاصطدامات في الحزام لم يكن أعلى بكثير مما هو عليه اليوم منذ تكوّن القشرة. لهذه الأسباب، يُعتقد أن معظم الكتلة الأصلية لحزام الكويكبات قد أُزيلت في مرحلة مبكرة جدًا بفعل عملية ديناميكية، وليس بفعل التآكل الناتج عن الاصطدامات.

أبرز ما يُميز حزام الكويكبات الرئيسي هو انخفاض كتلته بشكل كبير مقارنةً بأجزاء أخرى من النظام الشمسي، حيث تبلغ الكتلة الإجمالية للكويكبات المعروفة 2000/1 من كتلة الأرض. ويُشير تقديرٌ تقريبيٌّ لكمية الكتلة

[1] ( https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/asteroid-belts

الموجودة في منطقتي الكواكب الأرضية والكواكب العملاقة إلى أن حزام الكويكبات كان يحتوي في السابق على كتلة تُعادل عدة أضعاف كتلة الأرض من المواد الصلبة. وتُشير نماذج التطور التصادمي لحزام الكويكبات إلى وجود عدد من الأجسام أصغر من سيريس يتراوح بين 10 و200 ضعف ما هو موجود اليوم. ويبدو من المرجح أن أجسامًا أكبر قد تشكلت هنا أيضًا، إلا إذا ظهر كوكب المشتري في مرحلة مبكرة بحيث حالت اضطراباته الجاذبية دون النمو الجامح والنمو المُهيمن في حزام الكويكبات.

تتمتع الكويكبات التي يزيد حجمها عن 100 كيلومتر تقريبًا بعمر تفكك تصادمي أطول من عمر النظام الشمسي، مما يُشير إلى أن معظم الكتلة البدائية في حزام الكويكبات قد أُزيلت ديناميكيًا وليس عن طريق التفتت التصادمي. يشير الحفاظ على جزء كبير من قشرة فيستا، التي تشكلت في الملايين القليلة الأولى من عمر النظام الشمسي، إلى أن التآكل الناتج عن التصادمات لم يلعب دورًا كبيرًا في استنزاف كتلة حزام الكويكبات. وقد طُرحت عدة نماذج ديناميكية لتفسير فقدان جزء كبير من الكتلة البدائية للحزام، فضلًا عن ميل مدارات العديد من الكويكبات وانحرافها الشديد. ولا يزال من غير الواضح أي من هذه العمليات أدى إلى نشأة الحزام الحالي، وقد يكون لأكثر من عملية دور في ذلك. ومن الجدير بالذكر أيضًا أن حزام الكويكبات لا يزال يتطور ويفقد كتلته حتى اليوم.



## الجليد المائي في حزام الكويكبات asteroid belt

رصد مرصد هيرشل بخار الماء على سيريس Ceres، كشفت عمليات رصد دقيقة للكويكب سيريس عن وجود بصمات واضحة للماء عليه. فقد عثر فريق دولي من علماء الفلك، من بينهم توماس مولر Thomas Müller من معهد ماكس بلانك Max Planck للفيزياء الفلكية، على بصمة الماء في بعض أطياف سيريس Ceres الملتقطة بواسطة مرصد هيرشل Herschel الفضائي. علاوة على ذلك، يبدو أن كمية بخار الماء تتفاوت على طول مدار الكويكب، حيث تزداد هذه البصمة كلما اقترب سيريس من الشمس. وبينما يؤكد هذا الاكتشاف تلميحات سابقة بوجود خزانات من الماء، أو بالأحرى الجليد، في حزام الكويكبات الرئيسي، فإنه يثير تساؤلات حول أصل الماء وتوزيعه في نظامنا الشمسي.

ظهرت في السنوات الأخيرة بعض الأدلة على أن الأجرام الصغيرة في حزام الكويكبات، التي تبعد عن الشمس ما بين وحدتين إلى ثلاث وحدات فلكية فقط، تحتوي على جليد. وتُظهر بعض هذه الأجرام ثورات متفرقة تشبه ثورات المذنبات؛ ولذلك يُطلق عليها بعض علماء الفلك اسم "مذنبات الحزام الرئيسي". ولكن حتى الآن، لم يُعثر على دليل مباشر على وجود الماء فيها.

تمكن فريق دولي من العلماء، من بينهم توماس مولر من معهد ماكس بلانك للفيزياء الفلكية، من الحصول على بيانات رصدية دقيقة لسيريس، أكبر جرم في حزام الكويكبات، وعثروا على آثار واضحة للماء. وباستخدام جهاز HIFI على متن مرصد هيرشل الفضائي بالأشعة تحت الحمراء، استطاع العلماء تسجيل أطياف على مدى عدة أشهر تحمل البصمة الفريدة لبخار الماء.

يوضح توماس مولر قائلاً: "ترتبط شدة خط الماء بمناطق داكنة معينة على السطح؛ وهذه إما مناطق أكثر دفئًا أو فوهات ناتجة عن اصطدام كشف عن طبقات من الجليد في أعماق أكبر. علاوة على ذلك، تمكنا من تتبع كيفية تغير كمية الماء على طول مسار الكويكب حول الشمس: فإذا اقترب من الشمس، تزداد كمية الماء، ثم تنخفض مرة أخرى في الأجزاء الأبعد من مداره."

عموماً، سيريس جرمٌ داكن، لا يعكس سوى 10% تقريباً من ضوء الشمس؛ لذا لا توجد أسطح جليدية ساطعة عليه. لذلك، لا بد أن يكون الماء والجليد مختبئين تحت طبقة من الغبار أو الحطام، وربما لا يظهران إلا في أماكن قليلة يكون فيها الجليد قريباً نسبياً من السطح. ولعل هذه "الطبقة العازلة" هي السبب في قدرة الجليد

على البقاء على سيريس: فبسبب شدة الإشعاع الشمسي العالية، يكون عمر الجليد على السطح مباشرةً قصيراً جداً. بعد أن تم إثبات وجود الماء على سيريس بنجاح، لا يزال السؤال مطروحًا حول أصله. هل تشكّل الكويكب في المراحل المبكرة للنظام الشمسي من مزيج من الكواكب الصخرية الصغيرة التي تشكلت محليًا وقطع جليدية قادمة من النظام الشمسي الخارجي؟ في هذه الحالة، كيف استطاع الجليد الصمود أمام درجات الحرارة العالية في أعماق النظام الشمسي؟ أم أن جليد الماء على سيريس قد أُضيف في مرحلة لاحقة ونشطة للغاية من النظام الشمسي على شكل أجسام جليدية صغيرة؟ لا تزال آثار هذه "المرحلة المتأخرة من القصف" مرئية على شكل فوهات على سطح القمر - ربما وصل الماء الموجود في محيطاتنا إلى الأرض في ذلك الوقت المتأخر عن طريق المذنبات. وبالتالي، ربما يكون سيريس قد تشكّل جافًا، وربما يكون قد حصل على جليد الماء بعد حوالي 700 مليون سنة.

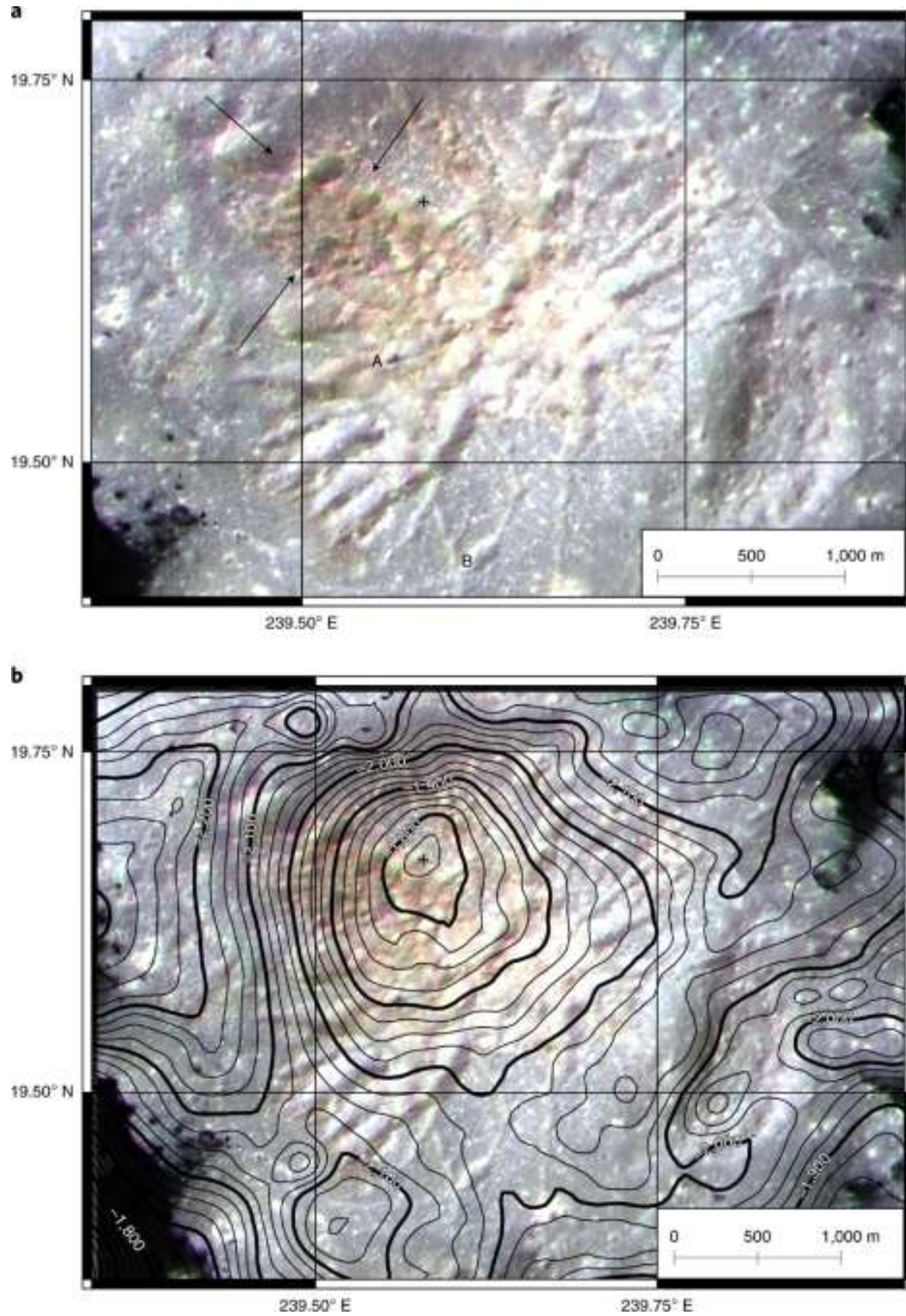
## عالم محيطي في حزام الكويكبات

يُظهر سطح سيريس وبنيته الداخلية أدلة على عملية تحوّل مائي عالمية[1]، مما يشير إلى وجود محيط في الماضي. مع ذلك، ليس من الواضح ما إذا كان جزء من هذا المحيط لا يزال موجودًا، وما إذا كانت سوائل متبقية لا تزال تدور في الكوكب القزم. قد تكون هذه السوائل مكشوفة على سطح حديث التكوين جيولوجيًا، ويُعدّ موقع قبة سيرياليا فاكولا، في فوهة أوكاتور، الموقع الأكثر ترجيحًا للتحقق من وجود سوائل حالية على سيريس. تُظهر هذه القبة الحديثة جدًا معادن نادرة نسبيًا في نظامنا الشمسي، ويتطلب تكوينها وجود الماء السائل بالإضافة إلى النشاط الحراري المائي. هنا، نُعلن عن اكتشاف كلوريد الصوديوم المُمَيَّأ على قبة سيرياليا فاكولا. تتركز أملاح الكلوريد المُكتشفة حديثًا في قمة القبة، بالقرب من نظام من الشقوق الشعاعية. يُشير التوزيع المكاني للمرحلة المُمَيَّأة إلى أن أملاح الكلوريد هي البقايا الصلبة لمحاليل ملحية عميقة وصلت إلى السطح مؤخرًا، أو لا تزال تصعد. تُعد هذه الأملاح فعالة للغاية في الحفاظ على درجة الحرارة الداخلية الدافئة لسيريس وخفض درجة حرارة اليوتكتيك للمحاليل الملحية، وفي هذه الحالة قد توجد سوائل مالحة صاعدة في سيريس اليوم.

أظهرت البيانات التي جمعتها مهمة داون أن سيريس يبدو وكأنه نحت بفعل الماء، مما يشير إلى وجود كميات كبيرة من الجليد تحت السطح، بالإضافة إلى انكشافات جليدية سطحية معزولة. وقد فُسِّر جبل أهونا مؤنس Ahuna Mons وجبال قُببية domical أخرى على أنها تعبير عن نشاط بركاني جليدي محتمل. وبالمثل، اقتُرح النشاط البركاني الجليدي كتفسير محتمل للملاحظات المتقطعة لانبعاث الماء من سيريس. كما قدمت بيانات داون أدلة على عملية عالمية للتغيرات المائية، مما يشير إلى وجود محيط في تاريخ سيريس الماضي. ومع ذلك، فإنه ليس من الواضح ما إذا كان جزء من هذا المحيط لا يزال موجودًا كبقايا، وما إذا كانت السوائل المتبقية لا تزال تدور في داخله. تُعد بقعة سيرياليا Cerealia في فوهة أوكاتور Occator أبرز معلم ساطع مرتبط بنشاط مائي حديث، وتقع في الحفرة المركزية لفوهة أوكاتور، التي تضم أيضًا قبة سيرياليا ثولوس Cerealia Tholus في مركزها. تتميز قبة سيريليا ثولوس بسلسلة من الصدوع الشعاعية المنحرفة عن مركز أعلى نقطة طوبوغرافية.

---

[1] M. C. De Sanctis, E. Ammannito, A. Raponi, A. Frigeri, M. Ferrari, F. G. Carrozzo, M. Ciarniello, M. Formisano, B. Rousseau, F. Tosi, F. Zambon, C. A. Raymond & C. T. Russell, Fresh emplacement of hydrated sodium chloride on Ceres from ascending salty fluids, Nature Astronomy volume 4, pages 786–793 (2020)




أ- بيانات ألوان FC المُحسّنة بتقنية Pan-sharpened (R = 750 nm, G = 920 nm, B = 980 nm). يوضح الشكل 1ب الموقعين اللذين تم الحصول منهما على الطيفين الأزرق (أ) والبرتقالي (ب). تشير الأسهم إلى المنطقة المتصدعة بكثافة والواقعة بجوار القمة وعلى طول الجانب الشمالي الغربي من Cerealia Tholus. يشير رمز الصليب إلى موضع القمة الطبوغرافية للثولوس. ب- فسيفساء ألوان FC المُحسّنة بتقنية Pan-sharpened مع خطوط تساوي التضاريس المحسوبة كارتفاع على أفضل شكل بيضاوي ملائم (نصف المحور أ = 482 كم، نصف المحور ب = 446 كم) لشكل سيريس. تفصل بين خطوط التساوي الرقيقة مسافة 25 مترًا. تُظهر خطوط التساوي الشكل غير المتناظر للثولوس. تقع القمة الطبوغرافية للثولوس (علامة الصليب الأسود) خارج نمط الكسر المتمركز على سيرياليا.

## تم رصد بخار الماء في حزام الكويكبات في النظام الشمسي

يحتوي النظام الشمسي على كمية لا بأس بها من الماء. فالعديد من الأقمار والكواكب غنية به[1]، بينما تمتلئ المذنبات القادمة من أطرافه البعيدة به. وعندما يسخن الماء بفعل حرارة الشمس، يتسامى إلى غاز ينجرف في فراغ الفضاء. ورغم رصد جليد الماء في الحزام الرئيسي للكويكبات، إلا أن بخاره كان غائباً بشكل غريب حتى الآن. وبفضل تلسكوب جيمس ويب الفضائي، بتنا نعلم بوجود الماء في حزام الكويكبات.

يُقذف الماء من أحد المذنبات النادرة في الحزام الرئيسي، وهو المذنب P/Read238، مما يكشف عن وجود ماء محفوظ هناك منذ زمن تكوين النظام الشمسي. وكان العلماء يعتقدون أن الظروف قد تكون قريبة جداً من الشمس بحيث لا تسمح ببقاء كميات كبيرة من الجليد. ويؤكد هذا الاكتشاف أيضاً أن أجسام حزام الكويكبات ربما ساهمت في إيصال الماء إلى الأرض عندما كان النظام الشمسي لا يزال في مراحله الأولى، وأن مذنبات الحزام الرئيسي تحتوي على كمية كافية من الجليد لتكوين الغازات الناتجة عن تسامي هذا الجليد تحت حرارة الشمس. في السابق، لم يتم رصد سوى الغبار، وليس انبعاث الغازات البخارية، المنبعثة من مذنبات الحزام الرئيسي.

معظم الأجسام في حزام الكويكبات، كما هو متوقع، هي كويكبات، وهي عبارة عن كتل صخرية خاملة نسبيًا تسبح في الفضاء. أما المذنبات، على النقيض، فتتميز بنشاطها، الذي يتأثر بشكل كبير بتكوينها الجليدي والغباري. تدور المذنبات عادةً حول الشمس في مدارات بيضاوية كبيرة تنقلها من أطراف النظام الشمسي. يتسامى الجليد الموجود داخلها عندما تقترب من الشمس (في نقطة تُسمى الحضيض)، مُكوّنًا غلافًا جويًا غباريًا غازيًا وذيولًا طويلة تنطلق بعيدًا عن الشمس. لم ترصد سوى عدد قليل من المذنبات في الحزام الرئيسي، ولكن نظرًا لقربها النسبي من الشمس، لم يكن العلماء متأكدين مما إذا كانت تحتوي على كمية كافية من المواد المتجمدة لإحداث التسامي الذي يُلاحظ في المذنبات القادمة من مسافات أبعد.

على الرغم من أن مدار المذنب ريد Comet Read's orbit يقع بالكامل داخل حزام الكويكبات، إلا أن هذه المنطقة لا تزال واسعة نسبياً من النظام الشمسي، ولا يزال للمذنب نقطة حضيض. خلال هذه المرحلة من

[1] ) https://www.sciencealert.com/water-vapor-detected-in-the-solar-systems-asteroid-belt-for-first-time
Michael S. P. Kelley, Henry H. Hsieh, Dennis Bodewits, Mohammad Saki, Geronimo L. Villanueva, Stefanie N. Milam & Heidi B. Hammel, Spectroscopic identification of water emission from a main-belt comet, Nature volume 619, (2023) pages 720–723

مداره، استخدم فريق بقيادة عالم الفلك مايكل كيلي Michael Kelley من جامعة ميريلاند Maryland تلسكوب جيمس ويب الفضائي لدراسته عن كثب بحثاً عن أي علامات لانبعاث الغازات. باستخدام مطياف الأشعة تحت الحمراء القريبة للتلسكوب، التقط الباحثون وحلّلوا طيف الضوء المنبعث من الضباب الكثيف الذي ظهر حول المذنب أثناء اقترابه من الشمس. وبالفعل، كشفت قمم الطيف ليس فقط عن انبعاث غازات، بل عن انبعاث الماء أيضًا.

يوضح كيلي: "في السابق، رصدنا أجسامًا في الحزام الرئيسي تحمل جميع خصائص المذنبات، ولكن فقط بفضل هذه البيانات الطيفية الدقيقة من تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST) يمكننا الجزم بأن جليد الماء هو المسؤول عن هذا التأثير". ويضيف: "بفضل رصد تلسكوب جيمس ويب الفضائي للمذنب ريد، أصبح بإمكاننا الآن إثبات إمكانية حفظ جليد الماء من النظام الشمسي المبكر في حزام الكويكبات". لكن الغريب أن شيئًا ما كان مفقودًا. ففي تناقض صارخ ومحير مع المذنبات الأخرى في النظام الشمسي، حيث يشكل ثاني أكسيد الكربون عادةً ما بين 10 إلى 20 بالمئة من موادها المتطايرة، لم يتمكن الباحثون من رصد أي انبعاث لثاني أكسيد الكربون من المذنب ريد.

تشير النماذج إلى أن بعض الأجسام الجليدية ربما تكون قد هاجرت إلى حزام الكويكبات[1]. وتشير الملاحظات الحديثة إلى وجود جليد مائي على سطح بعض الكويكبات، مع كون التسامي سببًا محتملاً لنشاط الغبار المرصود على كويكبات أخرى. وقد عُثر على معادن مائية على سطح أكبر جرم في حزام الكويكبات، وهو الكوكب القزم سيريس، الذي يُعتقد أنه يتكون من نواة سيليكاتية ذات غلاف جليدي. وقد أشارت بعض الملاحظات اللاحقة الأكثر حساسية إلى وجود بخار ماء حول سيريس، حيث يُنتج ما لا يقل عن $10^{26}$ جزيئًا في الثانية، من مصادر محلية يبدو أنها مرتبطة بمناطق خطوط العرض المتوسطة على سطحه. قد يكون تبخر الماء ناتجًا عن التسامي الشبيه بتسامي المذنبات أو عن النشاط البركاني الجليدي، حيث تقذف البراكين مواد متطايرة كالماء بدلًا من الصخور المنصهرة.

---

[1] Michael Küppers, Laurence O'Rourke, Dominique Bockelée-Morvan, Vladimir Zakharov, Seungwon Lee, Paul von Allmen, Benoît Carry, David Teyssier, Anthony Marston, Thomas Müller, Jacques Crovisier, M. Antonietta Barucci & Raphael Moreno, Localized sources of water vapour on the dwarf planet (1) Ceres, Nature volume 505, pages 525–527 (2014)

قال الدكتور توم بريتيمان Tom Prettyman ، العالم البارز في معهد علوم الكواكب، وزملاؤه: يُعدّ الكوكب القزم سيريس، وهو أكبر جرم في حزام الكويكبات الرئيسي، غنيًا بالماء". وأضافوا: "يتكون متوسط البنية الداخلية لسيريس من غلاف صخري وقشرة سميكة يبلغ سمكها 40 كيلومترًا (25 ميلًا)، تهيمن عليها بقايا متجمدة لمحيط عالمي قديم". وتابعوا: "تشير القيود الريولوجية Rheological إلى أن القشرة غنية بالمواد المتطايرة، وتحتوي على جليد مائي، وسيليكات صفائحية، وأملاح، وربما هيدرات كلاثريتية clathrate hydrates.

قال الباحثون: "يحتوي المتر الخارجي من سيريس على جليد مائي يتسامى تدريجيًا استجابةً لتسخين سطحه بأشعة الشمس. ونظرًا لأن محور دوران سيريس عمودي تقريبًا على أشعة الشمس، فقد انحسر الجليد إلى أعماق أكبر عند خط الاستواء مقارنةً بالقطبين. افترضنا أن الاصطدامات يمكن أن تنقل الجليد المائي من القشرة الخارجية إلى السطح، مما يُجدد التربة السطحية بالجليد". وأضافوا: "لذا، فإن توزيع الجليد المائي القريب من السطح في الطبقات العليا من التربة السطحية، كما رصده جهاز GRaND، يتأثر بكلٍ من الاصطدامات الكبيرة والتسامي الناتج عن الإشعاع الشمسي على المدى الطويل".

رصد مطياف النيوترونات[1] GRaND تركيزات مرتفعة من الهيدروجين في المتر الخارجي من سطح فوهة أوكاتور Occator ، وهي فوهة معقدة حديثة التكوين، يبلغ قطرها 90 كيلومترًا (56 ميلًا)، وتقع عند خط عرض 19.82 درجة شمالًا، حيث لا يُتوقع وجود جليد بالقرب من السطح. وقال الباحثون: "يوجد الهيدروجين الزائد على شكل جليد مائي". وأضافوا: "تؤكد النتائج أن القشرة الخارجية لسيريس غنية بالجليد، وأن الجليد المائي قادر على البقاء ضمن المقذوفات الناتجة عن الاصطدامات على الأجرام الجليدية الخالية من الهواء". وتشير البيانات إلى تحكم جزئي في توزيع الجليد القريب من السطح بفعل الاصطدامات الكبيرة، كما توفر قيودًا على عمر السطح والخصائص الحرارية الفيزيائية للتربة السطحية.

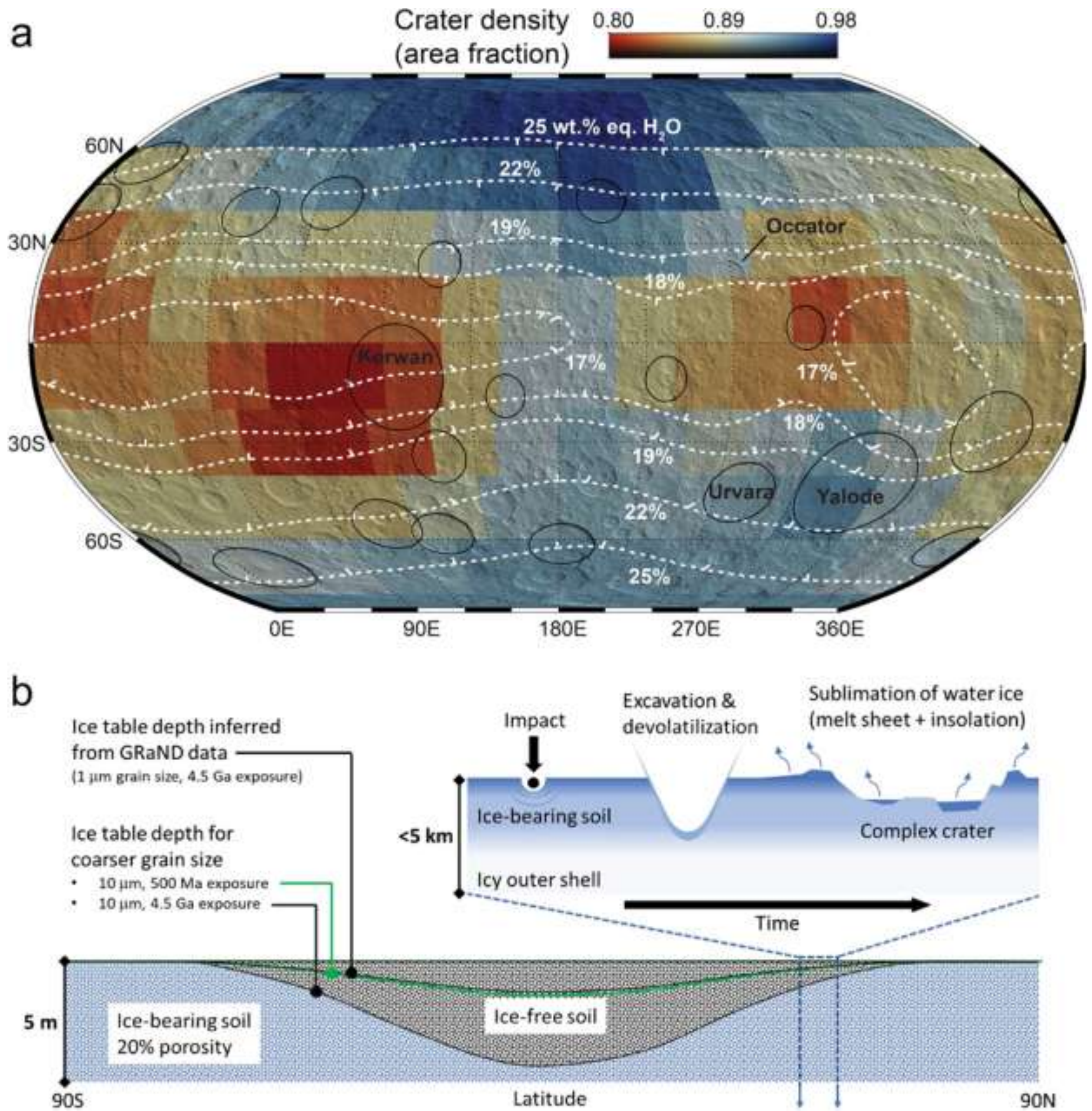
قال الدكتور بريتيمان: "نعتقد أن الجليد قد نجا في الطبقات السطحية الضحلة خلال العشرين مليون سنة التي تلت تكوّن فوهة أوكاتور". وأضاف: "تشير أوجه التشابه بين التوزيع العالمي للهيدروجين ونمط الفوهات الكبيرة إلى أن عمليات الاصطدام قد نقلت الجليد إلى السطح في أماكن أخرى من سيريس". وتابع: "تترافق هذه

[1] T. H. Prettyman, N. Yamashita, M. E. Landis, J. C. Castillo-Rogez, N. Schörghofer, C. M. Pieters, H. G. Sizemore, H. Hiesinger, S. Marchi, H. Y. McSween, R. S. Park, M. J. Toplis, C. A. Raymond, C. T. Russell, Replenishment of Near-Surface Water Ice by Impacts Into Ceres' Volatile-Rich Crust: Observations by Dawn's Gamma Ray and Neutron Detector, Geophysical Research Letters, Volume 48, Issue 15, 2021

العملية مع فقدان الجليد عن طريق التسامي الناتج عن تسخين السطح بأشعة الشمس". وأوضح: "كان من شأن الاصطدام الذي شكّل فوهة أوكاتور أن يحفر مواد قشرية بعمق يصل إلى 10 كيلومترات (6 أميال)". وأردف: "لذا، فإن الزيادة الملحوظة في تركيز الهيدروجين داخل الفوهة وغطاء المقذوفات تدعم تفسيرنا بأن القشرة غنية بالجليد". "تعزز هذه النتائج الإجماع الناشئ على أن سيريس جسم متمايز انفصل فيه الجليد عن الصخور ليشكل غلافًا جليديًا خارجيًا ومحيطًا تحت القشرة". "ربما لم تخضع الأجسام الأصغر حجمًا والغنية بالماء، بما في ذلك الأجسام الأم للنيازك الكوندريتية الكربونية، لعملية تمايز". "لذا، قد يكون لهذه النتائج آثار على تطور الأجسام الجليدية، الصغيرة منها والكبيرة".

تشير تحليلاتنا إلى أن توزيع جليد الماء داخل التربة السطحية لسيريس يخضع لسيطرة مزيج من التسامي الناتج عن الإشعاع الشمسي، ونقل المواد الحاملة للماء إلى التربة السطحية من القشرة الخارجية الغنية بالمواد المتطايرة بفعل الاصطدامات الكبيرة. ويُظهر التركيز الملحوظ للهيدروجين داخل فوهة أوكاتور وغطاء المقذوفات أن الجليد المُستخرج لا ينجو فقط من الاصطدامات الكبيرة، بل يُعزز أيضًا تركيز الجليد في الطبقات السطحية الضحلة. وتشير الارتباطات بين نمط الفوهات الكبيرة وتوزيع الهيدروجين إلى أن هذه العملية قد تكون منتشرة على نطاق واسع في سيريس. ومن شأن تجديد التربة السطحية بالجليد القشري بفعل الاصطدامات أن يُفسر بيانات GRaND بأعمار سطحية أصغر وأحجام حبيبات تربة سطحية أكبر، وهو ما يتوافق بشكل أكبر مع تلك المُستنتجة من التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء.

وتدعم بيانات GRaND عالية الدقة الأصل القشري الداخلي للجليد داخل التربة السطحية. بما أن عمق الحفر في أوكاتور بلغ قرابة 10 كيلومترات، فإن نتائجنا تُقدّم دليلاً مباشراً على وجود كمية كبيرة من الجليد في قشرة سيريس، وهو ما يتوافق مع الاستنتاجات غير المباشرة المستقاة من الملاحظات الجيولوجية. وبالتالي، فإن التفسيرات البديلة لبيانات داون الجيوفيزيائية، التي تفترض خلو سيريس من الجليد، تتعارض مع بيانات GRaND. كما تدعم النتائج التفسير الحديث للون الأزرق المميز للمقذوفات من فوهات الاصطدام الحديثة، باعتباره مزيجاً متطوراً من الجليد والمعادن.



تُعدّ عمليات الاصطدام عاملاً جزئياً في التحكم بالتوزيع العالمي للهيدروجين. (أ) تُقارن خريطة كثافة الفوهات الكبيرة بالتوزيع العالمي للهيدروجين الذي قاسه كاشف أشعة غاما والنيوترونات (GRaND) (الخطوط البيضاء). حُدِّدت الخريطة بتنعيم نمط الفوهات الكبيرة (قطرها من 20 إلى 100 كم) لتتوافق مع الدقة المكانية لجهاز GRaND في مرصد LAMO باستخدام خوارزمية التنعيم. تشير الكثافة 1 إلى أن الفوهات تُغطي السطح بالكامل ضمن مجال رؤية GRaND. ولتوضيح السياق، وُضِعت الخريطة فوق تضاريس مُظلَّلة، وحُدِّدت الأحواض المستبعدة التي يزيد قطرها عن 100 كم (باللون الأسود). يوضح الشكل (ب) سيناريو مُحتملاً لإثراء الجليد السطحي بفعل الاصطدامات الكبيرة. يبقى جزء من الجليد المُستخرج من القشرة الأرضية أثناء تكوّن الفوهات وتبريد طبقة الذوبان وغطاء المقذوفات، مما يُثري التربة السطحية بالجليد المائي. يتراجع الجليد المتبقي استجابةً للإشعاع الشمسي.

## مصادر مياه الأرض ونشأتها

نشرت مجلة الفلك[1] : تشكلت الأرض وبقية الكواكب داخل سديم غازي متبقٍ من نشأة الشمس. احتوت هذه المادة، المعروفة بالسديم الشمسي، على جميع العناصر التي شكلت الكواكب، وتفاوتت تركيباتها تبعًا للمسافة من الشمس. كانت المنطقة القريبة من النجم دافئة جدًا بحيث لم تتمكن بعض المواد من التكتل على شكل جليد، والذي تشكل بدلًا من ذلك في الجزء الخارجي من النظام الشمسي. حول الأرض، لم يتمكن الهيدروجين وعناصر أخرى من البقاء إلا في الحالة الغازية. ولأن السديم كان قصير العمر، يرجح معظم العلماء أن الأرض لم يكن لديها الوقت الكافي لجمع هذه الغازات قبل أن تتسرب إلى الفضاء. هذه الفكرة، إلى جانب النسبة العالية للديوتيريوم إلى الهيدروجين على الكوكب، دفعت الكثيرين إلى الاعتقاد بأن ماء الأرض لا بد أنه وصل بعد أن بردت الأرض. عندما زارت المركبة الفضائية الأوروبية "جيوتو" مذنب هالي عام 1986، لاحظ الباحثون أن محتواه من الماء الثقيل كان أعلى من الغاز الموجود في الجزء الذي كانت الأرض جزءًا منه في النظام الشمسي المبكر. ومن هنا ظهرت نظرية جديدة: ربما تكون المذنبات قد حملت الماء إلى الأرض في بداياتها. بعد تكوّن الكواكب، استمرت الأجرام السماوية الهائلة في إثارة الفوضى، حيث قذفت كواكب عملاقة كالمشتري بعض المواد نحو النظام الشمسي الداخلي. وربما تكون الأجسام الجليدية التي تشكلت في النظام الشمسي الخارجي قد قُذفت نحو الأرض لتتساقط على شكل أمطار من اصطدامات ضخمة محملة بالماء. ولكن مع قيام بعثات أخرى باستكشاف المزيد من المذنبات، اتضح أن كمية الماء الثقيل لم تكن ثابتة بينها. في الواقع، كانت نسب الماء الثقيل في معظم المذنبات أعلى بكثير من أن تكون مسؤولة عن تساقط الماء على الأرض. لا بد من وجود سبب آخر.

لم تكن المذنبات هي الشيء الوحيد الذي قذفته الكواكب الغازية العملاقة. فعندما شقّ المشتري طريقه عبر حزام الكويكبات في بدايات تاريخ نظامنا الشمسي، نثر الحطام الصخري في جميع الاتجاهات. ومثل المذنبات، تساقطت بعض هذه المواد على الأرض. ولكن على عكس المذنبات، لا تحبس الكويكبات الماء على شكل جليد، بل تحبس مكوناته - الهيدروجين والأكسجين - داخل المعادن. كذلك، فإن نسبة الماء الثقيل في الكويكبات أقرب بكثير إلى النسبة الحالية على الأرض. ولهذا السبب تُعدّ الكويكبات المشتبه بها الرئيسية كمصدر للمياه على كوكبنا.

[1] ( https://www.astronomy.com/science/where-did-earths-water-come-from/

تقول آن بيسلير Anne Peslier ، عالمة الجيوكيمياء في مركز جونسون للفضاء التابع لناسا: "في الحقيقة، نحن لا نتحدث عن الماء، بل عن الهيدروجين". تدرس بيسلير الجيوكيمياء في وشاح الأرض والكواكب الأرضية الأخرى، بما في ذلك الهيدروجين المحتجز داخل المعادن. عندما تشكلت الأرض، احتُجز الهيدروجين المحيط بالكوكب النامي في صخوره ومعادنه. وعندما تنصهر المعادن الغنية بالهيدروجين والأكسجين بفعل حرارة الوشاح، يمكن للماء الناتج أن يندفع من قشرة الكوكب. يتكون معظم الوشاح من الصخور، وقد تكون كميات هائلة من الهيدروجين والأكسجين محتجزة بداخله. ويُقدّر الباحثون أن ما يصل إلى عشرة محيطات من الماء قد توجد داخل الوشاح.

عادةً ما تُخرج البراكين الثائرة الصهارة من الجزء العلوي من وشاح الأرض، وهي المنطقة الأقرب إلى السطح. وتكون هذه الصهارة أكثر عرضةً للتلوث بالهيدروجين من القشرة الأرضية، التي تحتوي على نسب عالية من الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) مماثلة لتلك الموجودة في المحيطات اليوم. أما العينات الأكثر نقاءً فتوجد في أعماق الوشاح. وعلى الرغم من ارتفاع درجة الحرارة هناك، فإن أقل من 20% من صخور الوشاح قد انصهرت، كما يقول بيسلير. وعندما تثور الصهارة المنصهرة، قد يكون لها تأثير عنيف على الصخور الصلبة. ويضيف بيسلير: "إذا تدفقت الحمم البركانية بسرعة وعنف كافيين، فقد تقتطع أحيانًا أجزاءً مما تجتازه في طريقها". تصف الباحثة النتيجة - التي تُسمى زينوليث الوشاح، نسبةً إلى الكلمة اليونانية التي تعني "الصخر الغريب" - بأنها بلورات من الأوليفين الأخضر اللامع والبيروكسين الأسود مُدمجة في الحمم البركانية السوداء. إذا ما تم التقاط بلورات الأوليفين الغنية بالهيدروجين في وقت مبكر بما فيه الكفاية خلال تكوين الأرض، وبقيت دون تغيير طوال عمر الكوكب البالغ 4.5 مليار سنة، فقد تكشف عن مدى تغير النسب القديمة للماء الثقيل والماء العادي، إن وُجدت أصلاً. قد تُقدم هذه الكبسولات الزمنية الصغيرة إجابات للأسئلة القديمة المتعلقة بمصدر مياه الأرض. ولكن أولاً، كان لا بد من العثور عليها.

تشير هاليس Hallis إلى أنه تم العثور على العديد من النجوم الفتية محاطة بالغاز لمدة تصل إلى عشرة ملايين سنة. وهذا من شأنه أن يمنح الصخور الصغيرة التي شكلت الأرض في نهاية المطاف الوقت الكافي لدمج عناصر مثل الهيدروجين والنيتروجين في بنيتها. وتقول هاليس إن النيتروجين والهيدروجين في النظام الشمسي يميلان إلى التتابع - "إذا كان لديك نوع معين من الهيدروجين، فسيكون لديك نوع معين من النيتروجين". ويقول زاكاري

شارب، الباحث في جامعة نيو مكسيكو، والذي يرجّح أيضاً أن نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في الأرض قد تغيرت بمرور الوقت: "ربما لا تزال هناك جيوب في الأرض حافظت على مصدر الهيدروجين الأولي هذا

ليست نتائج هاليس وحدها التي تشير إلى أن الأرض ربما تكون قد جمعت معظم مياهها منذ البداية. فبينما كان يُعتقد سابقًا أن القمر جاف تمامًا، كشفت عمليات إعادة فحص حديثة لصخور أبولو القمرية عن آثار للماء. النظرية السائدة لتكوين القمر هي أنه تشكل عندما اصطدم جسم بحجم المريخ بالأرض الفتية. كان من المفترض أن يتبخر الماء السائل على السطح، مما دفع الكثيرين إلى استنتاج أن الأرض لا بد أنها جمعت المزيد من الماء من مكان آخر. لكن انخفاض نسب الديوتيريوم إلى الهيدروجين في عينات القمر يشير إلى أن القمر ربما يكون قد جمع الماء في معادن محصورة في باطنه، وهي منطقة لم يكن من الممكن أن تلوثها المذنبات أو الكويكبات. لاحقًا، قذفت الانفجارات البركانية تلك المواد إلى السطح، ليعيدها رواد الفضاء إلى الأرض. ما أهمية هذا؟ يقول هاليس إن درجات الحرارة المرتفعة بعد الاصطدام كانت ستكون مماثلة لتلك الموجودة في السديم الشمسي. يُعزز هذا من فرضية إمكانية تراكم المواد المتطايرة والماء حتى في النظام الشمسي المبكر الحار.

تُقدم الكويكبات أيضًا دلائل على أن مياه الأرض ربما تكون قد أتت من الغاز الذي نشأ منه الكواكب. تقول أليس ستيفانت Alice Stephant من جامعة ولاية أريزونا، والتي تدرس فيستا Vesta: "الآن بعد أن وجدنا قيمًا منخفضة في الأرض والقمر وفيستا، وكذلك في خزان المياه الموجود في الكويكبات، ربما أصبحت قصة [السديم] ممكنة". "يبدو أن جميعها تشترك في خزان مشترك يحتوي على نسبة أقل من [الديوتيريوم] مما كنا نعتقد".

## إن كانت الأرض عند التكوين مغطاة بالمياه فأين ذهبت هذه المياه

من المعروف أن المياه تغطى أكثر من 70% من مساحة الكرة الأرضية كلها، تتفق جميع الدراسات أن باطن الكرة الأرضية يحتوى على كميات هائلة من المياه يقدر حجمها 4-6 مرات حجم المياه الموجودة على سطح الكرة الأرضية، كذلك هناك دراسات وأبحاث كثيرة ظهرت حديثاً تؤكد أن الكرة الأرضية كانت مغطاة ومطمورة في المياه عند نشأتها، وأن عمر المياه زمنياً هي أقدم من عمر الكرة الأرضية. وفيما يلى سنتعرض لبعض الأبحاث الحديثة والتي تشرح ذلك الموضوع.

يُعدّ نقل المياه من سطح الأرض إلى باطنها العميق ودورانها على نطاق عالمي أمرًا بالغ الأهمية لفهم تطور الأرض وديناميكيتها[1]. وتتعدد الآراء حول محتوى الماء في باطن الأرض، منها ما يستند إلى تقدير تدفق المياه الناتج عن النشاط البركاني على سطح الأرض، بما في ذلك قاع المحيط، وتدفق المياه العائدة عن طريق انغماس الصفائح التكتونية استنادًا إلى القياسات الجيوفيزيائية لسرعة الصوت والتوصيل الكهربائي، بالإضافة إلى أدلة من عينات طبيعية، كالزجاج المستخرج من بازلتات سلاسل منتصف المحيط، ومحتوى الماء في معادن الوشاح، والشوائب المعدنية في الماس.

ينتقل الماء إلى أعماق الوشاح عبر المعادن المائية في الصفائح المنغرزة. أثناء الانغراز، يمكن أن تكون سلسلة من المعادن في هذه الصفائح، مثل السربنتين serpentine أو الكلوريت chlorite، والسورساسيت المغنيسيومي Mg–sursassite، أو الطور 10 أنغستروم 10 Å، والطور A، مستقرة عند ضغوط مختلفة ضمن منحنيات الحرارة الأرضية للصفيحة، وقد تنقل كميات كبيرة من الماء إلى باطن الأرض. تتمتع المنطقة الانتقالية بسعة تخزين مياه كبيرة نظرًا لذوبان الماء العالي في الوادسلييت wadsleyite والرينغوودديت ringwoodite. يشير الاكتشاف الحديث للرينغووديت المائي وطور Egg كشوائب في الماس فائق العمق من جوينا، البرازيل، إلى أن المنطقة الانتقالية قد تحتوي بالفعل على الماء. تشير الدراسات المقطعية الزلزالية وملاحظات التوصيل الكهربائي إلى أن المنطقة الانتقالية قد تحتوي على كميات كبيرة من الماء، على الأقل محليًا، أسفل مناطق الانغراز. يشير اكتشاف طور مائي جديد، H, $MgSiO_2(OH)_2$، ومحلوله الصلب بالإضافة مع الطور المتماثل بنيويًا δ-AlOOH، إلى إمكانية تخزين كمية كبيرة من الماء في هذا الطور المائي من سيليكات المغنيسيوم،

[1] Eiji Ohtani, Hydrous minerals and the storage of water in the deep mantle, Chemical Geology, Volume 418, 15 December 2015, Pages 6-15

المستقر حتى الوشاح السفلي. ويُحتمل أن ينتقل الماء إلى قاع الوشاح السفلي عبر المحلول الصلب δ–H في الصفائح الهابطة. يتميز هذا المحلول الصلب المائي الجديد، ذو الضغط العالي، بمعامل حجمي وسرعة صوت عاليين، نظرًا لقوة الرابطة O–H الناتجة عن تناظر الروابط الهيدروجينية في الوشاح السفلي. لذا، فإن الماء المخزن في هذا الطور المائي لا يُقلل من سرعة الموجات الزلزالية في الوشاح السفلي، وبالتالي فهو غير مرئي زلزاليًا. ومن ثم، قد يحدث انصهار ناتج عن الجفاف عند قاعدة الوشاح السفلي، مما يُقدم تفسيرًا محتملاً لمنطقة السرعة المنخفضة للغاية عند حدود اللب والوشاح. عندما تتلامس هذه المرحلة المائية من سيليكات المغنيسيوم أو المصهور المائي مع اللب الخارجي المعدني عند حدود اللب والوشاح، فمن المحتمل أن يذوب الهيدروجين في اللب.

نشرت The American Ceramic Society جاء فيه: يتميز غلاف الأرض العميق بنسبة منخفضة من الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D=H) قريبة جدًا من تلك الموجودة في نيازك الكوندريت الإينستاتيتية enstatite chondrite ، وهي اللبنات الأساسية للأرض الفتية. يشير هذا التشابه إلى أن الماء الموجود في باطن الأرض ربما يكون قد أتى مباشرةً من السديم الشمسي الأولي[1].

"مع ذلك، تثير هذه الفرضية عدة تساؤلات. فمقارنةً بمواد كوكبية أخرى كالحديد والسيليكات، يتميز الماء بدرجة حرارة تكثف أقل بكثير، وبالتالي كان من المفترض أن ينطلق إلى الفضاء عند درجة حرارة سطح الأرض المرتفعة في بداياتها، ثم بفعل اصطدام النيزك الذي شكّل القمر. ولتجنب الفقدان الكامل، لا بد أن الماء قد خُزّن داخل الأرض خلال فترة التراكم الأولى للكوكب"، كما كتب الباحثون في ورقة بحثية جديدة. ينتمي الباحثون إلى عدة جامعات في الصين ومعهد سكولكوفو Skolkovo للعلوم والتكنولوجيا في روسيا. ويقودهم البروفيسور شياو دونغ Xiao Dong من جامعة نانكاي Nankai بالتعاون مع البروفيسور أرتيم ر. أوغانوف Artem R. Oganov من معهد سكولكوفو.... في ورقتهم البحثية، يطرح الباحثون فرضية أخرى حول أصول الماء البدائي، وهي أنه كان موجودًا داخل المعادن المائية. المعادن المائية هي معادن تحتوي على الماء في تركيبها. عندما تتوفر ظروف معينة، كأن ينتقل المعدن إلى منطقة ذات ضغط منخفض، تتفكك المعادن وتُطلق الماء الموجود بداخلها.

---

[1] ) https://ceramics.org/ceramic-tech-today/probing-the-oceans-origins-ultrahigh-pressure-magnesium-/hydrosilicates-may-have-served-as-reservoirs-of-early-water

هناك كمٌّ كبير من الأبحاث حول دور المعادن المائية في آليات تخزين ونقل الماء داخل وشاح الأرض. وقد حظيت هيدروسيليكات المغنيسيوم تحديدًا باهتمام كبير نظرًا لكون الأكسجين والمغنيسيوم والسيليكون أكثر العناصر وفرةً في وشاح الأرض. مع ذلك، ركزت الأبحاث السابقة على هيدروسيليكات المغنيسيوم على الأشكال المتعددة الموجودة حاليًا في وشاح الأرض، وهي بيئة تختلف اختلافًا كبيرًا عن بيئة الوشاح خلال سنوات تكوين الأرض.

في الدراسة الجديدة، أراد الباحثون دراسة الأشكال المتعددة التي كان من الممكن أن تتحمل درجات الحرارة والضغوط العالية لعملية انفصال اللب عن الوشاح. خلال تلك الحقبة من تاريخ الأرض، كان توزيع العناصر فيها متجانساً إلى حد كبير، على عكس النواة المعدنية التي نعرفها اليوم. بعبارة أخرى، كانت العناصر المكونة لهيدروسيليكات المغنيسيوم متوفرة في أعماق الأرض منذ ملايين السنين.

ولتحديد الأشكال البلورية المحتملة لهيدروسيليكات المغنيسيوم، استخدم الباحثون خوارزمية تنبؤ بالبنية التطورية ذات التركيب المتغير، بالإضافة إلى محاكاة ديناميكيات الجزيئات من المبادئ الأولى لنمذجة النظام الثلاثي $MgO—SiO_2—H_2O$. وقد طُبقت خوارزمية التنبؤ بالبنية باستخدام برنامج USPEX، وهو أسلوب مبتكر لاكتشاف المواد الحاسوبي.

كشفت النمذجة عن شكلين بلوريين مستقرين ديناميكيًا حراريًا، كان من الممكن أن يصمدا أمام عملية انفصال اللب عن الوشاح، وهما: $\alpha$-$Mg_2SiO_5H_2$ و $\beta$-$Mg_2SiO_5H_2$، بشبكات أحادية الميل مركزية القاعدة. تحتوي هذه الهيدروسيليكات المغنيسيومية على أكثر من 11% من الماء وزنيًا، وهي مستقرة عند ضغوط تتجاوز مليوني ضغط جوي. يوضح الباحثون أن هذه الهيدروسيليكات المغنيسيومية كانت موجودة في الأصل في مركز الأرض أثناء تشكلها. ومع ذلك، ومع نمو اللب، انتقلت إلى أعماق أقل وضغوط أقل، وتفككت إلى $MgSiO_3$, MgO والماء. ويضيف الباحثون: "سينتقل الماء المنطلق تدريجيًا إلى سطح الأرض، ليشكل غلافها المائي. أما بالنسبة لمنتجات تفكك $Mg_2SiO_5H_2$ الأخرى، وهي $MgSiO_3$ و MgO، فلا تزال موجودة في الوشاح السفلي، وتؤدي دور أطواره الرئيسية".

يُعدّ أكسيد المغنيسيوم (MgO) والماء (H2O) من العناصر الوفيرة في باطن الكواكب. وتؤثر خصائصهما، ولا سيما تفاعلهما، تأثيرًا كبيرًا على بنية باطن الكوكب وتطوره الحراري. في هذه الدراسة، وباستخدام تنبؤات بنية

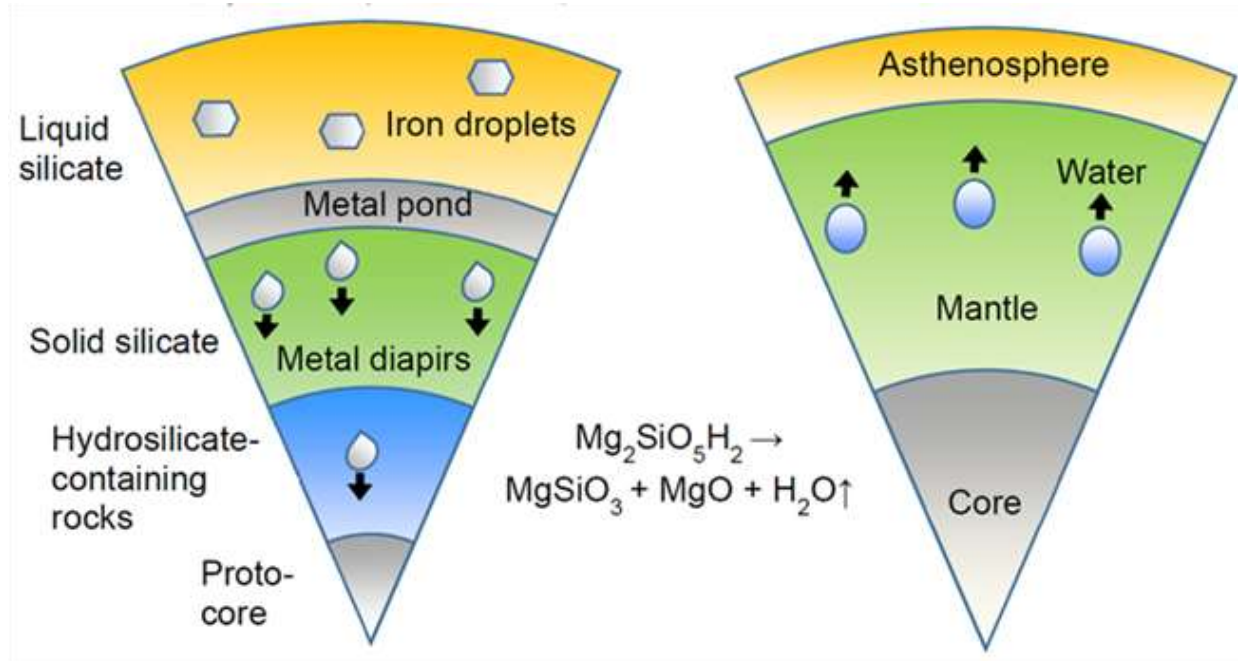
البلورات ومحاكاة ديناميكيات الجزيئات من المبادئ الأولى، وجدنا أن MgO وH2O يمكن أن يتفاعلا مجددًا عند ضغوط فائقة الارتفاع، على الرغم من أن Mg(OH)2 يتحلل عند ضغوط منخفضة. مركبات MgO-H2O المتجددة هي: Mg2O3H2 عند ضغوط أعلى من 400 جيجا باسكال، وMgO3H4 عند ضغوط أعلى من 600 جيجا باسكال، وMgO4H6 في نطاق الضغط من 270 إلى 600 جيجا باسكال. والجدير بالذكر أن MgO4H6 يحتوي على 57.3% من الماء وزنيًا، وهي نسبة أعلى بكثير من أي معدن مائي معروف. تشير نتائجنا إلى إمكانية تخزين كمية كبيرة من الماء في صخور MgO في أعماق الكواكب التي تتراوح كتلتها بين كتلة الأرض وكتلة نبتون. استنادًا إلى محاكاة الديناميكا الجزيئية، نُبين أن هذه المركبات الثلاثة تُظهر سلوكًا أيونيًا فائقًا في ظروف الضغط ودرجة الحرارة المشابهة لتلك الموجودة في باطن كوكبي أورانوس ونبتون. علاوة على ذلك، قد يكون مركب MgO4H6 الغني بالماء مستقرًا داخل الأرض في مراحلها المبكرة، وبالتالي قد يُشكل خزانًا محتملاً للمياه في تلك الحقبة. تُوفر نتائجنا، في نطاق الضغط العالي (ميغابار) الذي لم يُدرس بشكل كافٍ، قيودًا لنماذج باطن وتطور الكواكب الرطبة في نظامنا الشمسي وخارجه.

يُعدّ أكسيد المغنيسيوم (MgO) والماء (H2O) من العناصر الوفيرة في باطن الكواكب[1]. وتؤثر خصائصهما، ولا سيما تفاعلهما، تأثيرًا كبيرًا على بنية باطن الكوكب وتطوره الحراري، وباستخدام تنبؤات بنية البلورات ومحاكاة ديناميكيات الجزيئات من المبادئ الأولى، وجدن أن MgO و$H_2O$ يمكن أن يتفاعلا مجددًا عند ضغوط فائقة الارتفاع، على الرغم من أن $Mg(OH)_2$ يتحلل عند ضغوط منخفضة. مركبات $MgO\text{-}H_2O$ المتجددة هي: $Mg_2O_3H_2$ عند ضغوط أعلى من 400 جيجا باسكال، و$MgO_3H_4$ عند ضغوط أعلى من 600 جيجا باسكال، و$MgO_4H_6$ في نطاق الضغط من 270 إلى 600 جيجا باسكال. والجدير بالذكر أن $MgO_4H_6$ يحتوي على 57.3% من الماء وزنيًا، وهي نسبة أعلى بكثير من أي معدن مائي معروف. تشير نتائجنا إلى إمكانية تخزين كمية كبيرة من الماء في صخور MgO في أعماق الكواكب التي تتراوح كتلتها بين كتلة الأرض وكتلة نبتون. استنادًا إلى محاكاة الديناميكا الجزيئية، نُبين أن هذه المركبات الثلاثة تُظهر سلوكًا أيونيًا فائقًا في ظروف الضغط ودرجة الحرارة المشابهة لتلك الموجودة في باطن كوكبي أورانوس ونبتون. علاوة على ذلك، قد يكون مركب $MgO_4H_6$ الغني بالماء مستقرًا داخل الأرض في مراحلها المبكرة، وبالتالي قد يُشكل خزانًا محتملاً للمياه في تلك الحقبة. تُوفر نتائجنا،

[1] Shuning Pan, Tianheng Huang, Allona Vazan, Zhixin Liang, Cong Liu, Junjie Wang, Chris J. Pickard, Hui-Tian Wang, Dingyu Xing & Jian Sun, Magnesium oxide-water compounds at megabar pressure and implications on planetary interiors, Nature Communications volume 14, Article number: 1165 (2023)

في نطاق الضغط العالي (megabar) الذي لم يُدرس بشكل كافٍ، قيودًا لنماذج باطن وتطور الكواكب الرطبة في نظامنا الشمسي وخارجه.

علاوة على ذلك، قد يُساعد مركب $MgO_4H_6$ الغني بالماء في تفسير أصل الماء على الأرض. فقد وُجد أن مركبات هيدروسيليكات المغنيسيوم قادرة على تخزين كميات كبيرة من الماء (تصل إلى ثمانية أضعاف كتلة المحيط) في أعماق الأرض. وبالمثل، فإن مركب $MgO_4H_6$ الذي وجد في هذه الدراسة مستقر عند ضغوط أعلى من 270 جيجا باسكال، مما يُشير إلى إمكانية تخزين الماء في المنطقة المركزية للأرض في بداياتها على شكل $MgO_4H_6$. ووفقًا لهذا السيناريو، فإن سبائك الحديد الكثيفة التي غرقت في لب الأرض حملت معها مركب $MgO_4H_6$ إلى منطقة أقل عمقًا، حيث تحلل وأطلق الماء: $MgO_4H_6 \longrightarrow MgO + 3H_2O$.




**تطور الأرض المبكر الذي يشمل الهيدروسيليكات**

## الأرض التي تشكلت بفعل الغلاف الجوي البدائي للهيدروجين ($H_2$)

تُبيّن نماذج تكوين الكواكب وتطورها أن الكواكب الصخرية الخارجية تشكّلت عادةً بأغلفة غنية بالهيدروجين[1] فُقدت بمرور الوقت. تُشير هذه النتائج إلى أن الأرض ربما تكونت أيضًا من أجرام ذات أغلفة جوية أولية غنية بالهيدروجين. نستخدم هنا نموذجًا ديناميكيًا حراريًا متسقًا ذاتيًا لنُبيّن أن الماء وكثافة النواة وحالة الأكسدة الإجمالية للأرض يُمكن أن تُستمد جميعها من التوازن بين الأغلفة الجوية الأولية الغنية بالهيدروجين ومحيطات الصهارة الكامنة في أجنة الكواكب الأصلية. يتكوّن الماء من مواد أولية جافة تُشبه النيازك الكوندريتية من نوع إنستاتيت، حيث يتفاعل الأكسجين من محيطات الصهارة مع الهيدروجين. يدخل الهيدروجين المُستمد من الغلاف الجوي إلى محيط الصهارة، ثم إلى النواة المعدنية في النهاية عند التوازن، مما يُسبب نقصًا في كثافة المعادن يُطابق كثافة المعادن في الأرض. يحدث تأكسد للصخور السيليكاتية من مستويات أكسجين مماثلة لتلك الموجودة في الشمس إلى مستويات مماثلة لتلك الموجودة في الأرض، وذلك نتيجة لتفاعل السيليكون، إلى جانب الهيدروجين والأكسجين، مع الحديد في النوى. وبالتالي، فإن التفاعل مع الأغلفة الجوية الهيدروجينية وتوازن المعدن والسيليكات يوفر تفسيراً بسيطاً للخصائص الأساسية للكيمياء الجيولوجية للأرض، وهو تفسير يتوافق مع تكوين الكواكب الصخرية في جميع أنحاء المجرة.

تعود نماذج تراكم الأرض إلى عقود مضت. وتركز النسخ الحديثة منها غالبًا على مطابقة الخصائص الكيميائية للأرض من خلال إسناد خصائص كيميائية مختلفة إلى الأجنة الكوكبية المحتملة والكواكب الصغيرة في محاكاة عملية التراكم باستخدام نماذج الأجسام المتعددة. ولمطابقة التركيب الكيميائي للأرض، تُستخدم تدرجات في معايير مثل توافر الماء وفعالية الأكسجين عبر القرص الكوكبي الأولي، إلى جانب وصفات لتحقيق توازن جزئي أثناء أحداث التصادم المنفصلة. تتضمن هذه النماذج بالضرورة عددًا كبيرًا من المعايير القابلة للتعديل، مما يسمح بملاءمة معقولة. ورغم أن هذه النماذج سليمة منطقيًا، إلا أن دقتها أقل وضوحًا. نقدم هنا نهجًا بديلًا يأخذ في الاعتبار الرؤى الحديثة المكتسبة من تكوين الكواكب الخارجية الصخرية والدور المهم للأغلفة الجوية الأولية، ونستخدم هذا النهج لإعادة دراسة تكوين الأرض.

[1] Edward D. Young, Anat Shahar & Hilke E. Schlichting, Earth shaped by primordial H2 atmospheres, Nature volume (2023) 616, pages 306–311

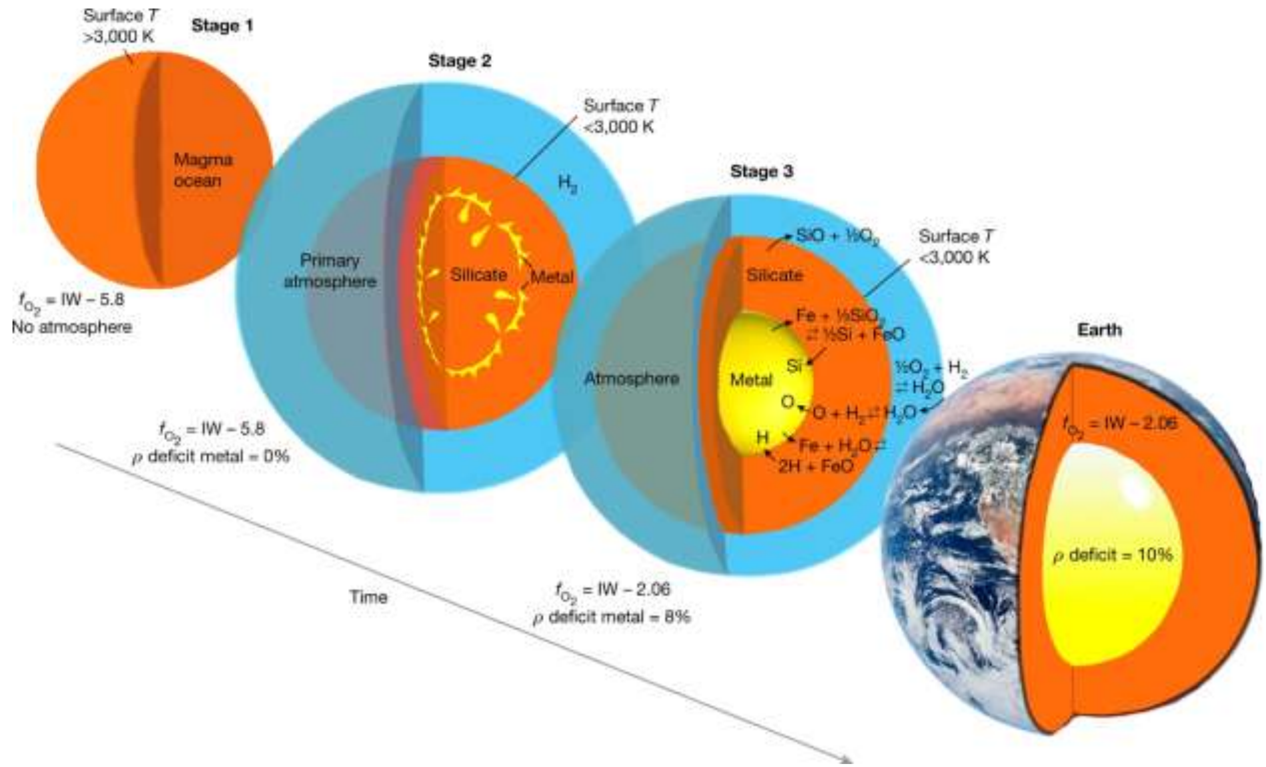
كشفت عمليات الرصد الحديثة للكواكب الخارجية أن أكثر الكواكب شيوعًا في مجرتنا المكتشفة حتى الآن أكبر من الأرض وأصغر من نبتون، وتنقسم إلى مجموعتين متميزتين. تتألف المجموعة الأولى من كواكب صخرية ذات أغلفة غنية بالهيدروجين ($H_2$) تشكل نسبة ضئيلة من كتلتها الإجمالية، وتُعرف باسم "كواكب نبتون الفرعية". أما المجموعة الثانية فتضم كواكب صخرية تفتقر إلى أغلفة جوية غنية بالهيدروجين، وتُعرف باسم "الأرض العملاقة". يفصل بين هاتين المجموعتين "فجوة نصف قطرية" في حجم الكواكب تتراوح بين $1.5\ R_\oplus$ و $2.0\ R_\oplus$. أظهرت نماذج تكوين الكواكب وتطورها، التي تفسر انخفاض نصف القطر، أن الكواكب الصخرية العملاقة الشبيهة بالأرض التي نرصدها اليوم ربما تكونت بأغلفة غنية بالهيدروجين ($H_2$) فُقدت بمرور الوقت (في غضون $10^8$ إلى $10^9$ سنوات تقريبًا) إما عن طريق التبخر الضوئي أو فقدان الكتلة الناتج عن فقدان النواة، مما يشير إلى أن الكواكب العملاقة الشبيهة بالأرض والكواكب الشبيهة بنبتون تشكلت في الأصل كمجموعة واحدة ذات أغلفة جوية غنية بالهيدروجين. ومن خلال دراسة هذه الكواكب الخارجية، ازداد تقديرنا لانتشار الأغلفة الجوية الغنية بالهيدروجين المتراكمة من الأقراص الكوكبية الأولية خلال الملايين الأولى من نمو الكواكب. وتوضح حساباتنا كيف أثرت هذه العملية على التركيب الكيميائي للأرض، وكيف يمكن وضع تكوين الأرض بنجاح في سياق تكوين الكواكب الصخرية الخارجية داخل مجرتنا.

على الرغم من أن تحلل النظير المشع قصير العمر $Al^{26}$ هيمن على البنية الحرارية للكواكب الصغيرة المتكونة في المراحل المبكرة من النظام الشمسي، إلا أن التاريخ الحراري للأجسام الأكبر كتلة (أكبر من $0.05\ M_\oplus$) كان محكومًا بتحويل طاقة الوضع التثاقلية إلى حرارة أثناء التراكم. ونتيجة لذلك، كانت الأجنة الكوكبية في النظام الشمسي المبكر منصهرة في البداية. وعند تبريدها إلى ما دون درجة حرارة السطح اللازمة للهروب الحراري لجزيئات الغاز، يُتوقع أن تكون الأجنة قد تراكمت عليها الغازات من القرص الكوكبي الأولي المحيط بها، وبالتالي اكتسبت أغلفة جوية أولية غنية بالهيدروجين. وبمجرد تراكم غلاف سميك بصريًا، يحدث تبريد لاحق لنظام الجنين والغلاف الجوي عبر الجزء العلوي من الغلاف الجوي عند الحد الفاصل بين الإشعاع والحمل الحراري. يتباطأ التبريد نسبيًا مقارنةً بالإشعاع الصادر من سطح محيط الصهارة بمعامل معين.

يُستدل على دخول غاز القرص الكوكبي الأولي (الغاز الشمسي) إلى مكونات الأرض الأساسية من خلال نسب نظائر الغازات النبيلة في صخور الوشاح. في المقابل، يبدو أن المريخ لا يحتوي على أي آثار للغاز الشمسي في باطنه. وبما أن الغاز يذوب في الصخور المنصهرة وليس في الصخور الصلبة، فإن غياب الغاز الشمسي في باطن

المريخ أمر متوقع. تشير القيود النظائرية، بالإضافة إلى تشابه كتلته مع ما يُسمى بكتلة العزل لسديم شمسي ذي كتلة دنيا، إلى أن المريخ جنين كوكبي نما خلال ما بين 2 و4 ملايين سنة تقريبًا، وربما كان يحتوي على محيط من الصهارة. ومع ذلك، لم تكن كتلة المريخ كافية للاحتفاظ بغلاف جوي غني بالهيدروجين عند درجات حرارة سطحية تتوافق مع الصخور المنصهرة، مما حال دون حدوث تبادل بين الغلاف الجوي وباطنه. بمقارنة طاقة الربط التثاقلي بالطاقة الحرارية لجزيئات غاز الهيدروجين، يتضح أن جسمًا بكتلة المريخ، أي $0.1\ M_{\oplus}$، لا يمكنه استيعاب غلاف جوي أولي غني بالهيدروجين من القرص إلا بعد أن تبرد سطحه إلى 700 كلفن أو أقل، أي أقل بكثير من درجة انصهار الصخور. لذا، يُتوقع ألا يكون محيط الصهارة قد تعرض للغلاف الجوي الأولي في حالة المريخ، وهو ما يتوافق مع القيود النظائرية.

مع ذلك، لم تكن جميع الأجنة الكوكبية التي نمت في وجود القرص الكوكبي الأولي بالضرورة بكتلة المريخ. فكثافة سطحية أكبر من كثافة السديم الشمسي ذي الكتلة الدنيا، والانجراف الشعاعي لمادة القرص، والهجرة الشعاعية للأجنة نفسها، و/أو النمو السريع الذي يُسهّله تراكم الحصى، كانت ستؤدي إلى نمو الأجنة لتصل كتلتها إلى عدة أعشار كتلة الأرض. وكانت هذه الأجرام ستحتفظ بأغلفة جوية أولية كبيرة من الهيدروجين الجزيئي (H2) بدرجات حرارة سطحية أعلى من 2000 كلفن، أي أعلى بكثير من درجة انصهار الهيدروجين الجزيئي. وتبلغ الكتلة الحدية لتراكم غلاف جوي غني بالهيدروجين الجزيئي بدرجات حرارة سطحية أعلى من درجة انصهار السيليكات، والتي تبلغ حوالي 1500 كلفن، حوالي $0.2\ M_{\oplus}$. وكما ذُكر سابقًا، بمجرد أن يتراكم على الجنين غلاف من الهيدروجين الجزيئي كثيف بصريًا، يمكن أن تستمر هذه الدرجات الحرارية طالما وُجد غلاف جوي كثيف بصريًا.




يوضح هذا العمل تسلسل الأحداث المؤدية إلى تكوين الماء ($H_2O$) والعناصر الخفيفة في المعادن وزيادة فاعلية الأكسجين في الأجنة الأولية للأرض. المرحلة الأولى هي مرحلة الجنين حيث تكون درجات حرارة السطح مرتفعة جدًا بحيث لا تسمح بالاحتفاظ بالغلاف الجوي الأولي للهيدروجين ($H_2$). المرحلة الثانية هي الحالة الأولية لحساباتنا، حيث تتراكم الأجنة المنصهرة وتحتفظ بالغلاف الجوي الأولي للهيدروجين. ربما يكون تمايز المعادن والسيليكات قد بدأ بالفعل في هذه المرحلة. المرحلة الثالثة هي نتيجة التوازن الكيميائي بين مصهورات السيليكات والمعادن مع الأغلفة الجوية المتطورة. توضح التعليقات التغيرات في فاعلية الأكسجين ونقص كثافة المعادن. التفاعلات الموضحة هي تبسيطات للمجموعة الكاملة، لأغراض التوضيح. يتحد جنينان أو أكثر من هذه الأجنة لتكوين الأرض النهائية. صورة الأرض من وكالة ناسا.

## الماء القديم في القرص الكوكبي الأولي أقدم من نجمه

اكتشف علماء الفلك وجود الماء الثقيل في القرص الذي يتشكل فيه الكوكب حول نجم شاب يُدعى[1] V883 Ori. تشير كمية الماء الثقيل التي رُصدت في القرص إلى أنه ماء قديم نشأ من السحابة الجزيئية التي شكلت النجم. وبالتالي، تشير الأبحاث الجديدة إلى أن الكثير من الماء في نظامنا الشمسي قد يكون أقدم من الشمس نفسها.

في الخامس عشر من أكتوبر عام 2025، أعلن علماء الفلك أنهم اكتشفوا -للمرة الأولى- وجود الماء الثقيل في القرص الكوكبي الأولي لنجم فتي. وبالتحديد، أظهرت رصدات التلسكوبات الراديوية للنجم V883 Ori وجود الماء الثقيل في قرصه الكوكبي الأولي. وقد تشكل هذا الماء عندما انهارت السحب الجزيئية لتكوين هذا النجم. وتشير النتائج إلى أن الماء في الأنظمة الكوكبية قد يكون أقدم من النجم الذي تشكل حوله. إضافةً إلى ذلك، كان نظامنا الشمسي يشبه إلى حد كبير كوكب V883 Ori، الذي يعود تاريخه إلى 4.5 مليار سنة. لذا، من المرجح أن بعض المياه التي تُغذي الحياة من حولنا أقدم حتى من الشمس نفسها.

مارغوت ليمكر Margot Leemker من جامعة ميلانو هي المؤلفة الرئيسية للورقة البحثية التي عرضت هذه النتائج الجديدة. وقالت: "يُثبت اكتشافنا بشكل قاطع أن الماء الموجود في هذا القرص المُشكِّل للكواكب أقدم من النجم المركزي، وقد تشكّل في المراحل الأولى لتكوّن النجوم والكواكب. يُمثّل هذا إنجازًا هامًا في فهم مسار الماء خلال عملية تكوّن الكواكب، وكيف وصل هذا الماء إلى نظامنا الشمسي، وربما إلى الأرض، عبر عمليات مماثلة."

الماء جزيء يتكون من ذرة أكسجين واحدة وذرتي هيدروجين. معظم ذرات الهيدروجين، التي تشكلت خلال الانفجار العظيم، تتكون من بروتون وإلكترون. بالإضافة إلى ذلك، أنتج الانفجار العظيم كميات ضئيلة جدًا من الديوتيريوم، وهو شكل من أشكال الهيدروجين يحتوي على بروتون وإلكترون ونيوترون. يُعرف الماء الثقيل كيميائيًا بالرمز $D_2O$، أي أن كل جزيء منه يتكون من ذرتي ديوتيريوم (D) وذرة أكسجين واحدة (O). في نظامنا

[1] ( https://earthsky.org/space/ancient-water-in-protoplanetary-disk-older-than-star/
Margot Leemker, John J. Tobin, Stefano Facchini, Pietro Curone, Alice S. Booth, Kenji Furuya & Merel L. R. van 't Hoff, Pristine ices in a planet-forming disk revealed by heavy water, Nature Astronomy volume 9, pages1486–1494 (2025)

الشمسي، يختلط الماء الثقيل بالماء العادي بكميات ضئيلة جدًا. على كوكب الأرض، يُشكل الماء الثقيل ما يقارب جزيء واحد من كل 41 مليون جزيء ماء.

لطالما أثار نشأة الماء في كوننا فضول علماء الفلك. كيف تشكل؟ ما عمره؟ هل نشأ الماء في نظامنا الشمسي من السحب الجزيئية قبل وجود الشمس؟ أم أنه فُني وأُعيد تكوينه خلال مرحلة تشكل الكواكب في نظامنا الشمسي؟ تتكون السحب الجزيئية في الفضاء من غازات وحبيبات غبار. الهيدروجين هو الغاز الأكثر وفرة، وقد تشكل خلال الانفجار العظيم. تشمل الغازات الأخرى في هذه السحب الأكسجين وأول أكسيد الكربون. كما توجد جزيئات غبار معلقة في السحب، معظمها من السيليكات وحبيبات الكربون. وقد تشكلت هذه الغازات والغبار الأثقل من نجوم ميتة منذ زمن طويل، انتهت على شكل سدم كوكبية أو مستعرات عظمى. في ظل ظروف معينة في هذه السحب الجزيئية شديدة البرودة، يتشكل الماء عندما تلتقط ذرات الأكسجين الموجودة على حبيبات الغبار ذرات الهيدروجين. ونتيجة لذلك، يتجمد الماء على حبيبات الغبار. إذا كانت السحابة الجزيئية ضخمة بما يكفي، فإن الجاذبية ستؤدي إلى انهيارها لتكوين نجم أولي. هذا نجم فتيّ لا يزال يكتسب كتلة من السحابة المحيطة به. تُولّد هذه العملية حرارةً هائلة. ونتيجةً لذلك، يتحوّل جزء من الماء المتجمّد قرب النجم الأولي إلى الحالة الغازية. مع ذلك، يبقى الماء في مناطق أخرى من سحابة الغبار متجمّدًا. تُشكّل الحركة الدورانية للنجم الأولي والسحابة المحيطة به قرصًا كوكبيًا أوليًا من الغاز والغبار. ومع تطوّر النظام، تتجمع أجرام مثل الكواكب في القرص. إضافةً إلى ذلك، تحمل المذنبات والكويكبات القادمة من الأطراف الخارجية الباردة للقرص المزيد من الماء إلى المناطق الداخلية. علاوةً على ذلك، قد يصطدم بعضها بالكواكب، مما يزيد من محتواها المائي.

لم يُنتج الانفجار العظيم مستويات عالية من الديوتيريوم، بل أنتجه بنسبة 27 جزءًا فقط في المليون مقارنةً بالهيدروجين العادي. لذا، يُتوقع أن يكون الماء الثقيل الموجود طبيعيًا في الكون نادرًا بنفس القدر. لكن الواقع ليس كذلك. فالعمليات الكيميائية المعقدة في السحب الجزيئية شديدة البرودة تُؤدي إلى هبوط المزيد من ذرات الديوتيريوم على حبيبات الغبار، لتتحد مع الأكسجين مُكوّنةً جليد الماء الثقيل. ونتيجةً لذلك، تحتوي السحب الجزيئية على نسبة أعلى من المتوقع من الماء الثقيل إلى الماء العادي، مقارنةً بنسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في الكون.

استخدم علماء الفلك مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA) لقياس نسبة الماء الثقيل إلى الماء العادي في قرص تكوين الكواكب V883 Ori. ووجدوا أنها مشابهة للنسبة الموجودة في السحب الجزيئية المُكوِّنة للنجوم. يعمل الماء الثقيل كمؤشر، مما يدل على أن بعض الماء في قرص V883 Ori نشأ من السحابة الجزيئية التي كوّنت النجم. إذا كان هذا صحيحًا، فقد ينطبق الأمر نفسه على نظامنا الشمسي. قال جون توبين، المؤلف المشارك في الورقة البحثية من المرصد الوطني لعلم الفلك الراديوي: "حتى الآن، لم نكن متأكدين مما إذا كان معظم الماء في المذنبات والكواكب قد تشكل حديثًا في أقراص فتية مثل V883 Ori، أو ما إذا كان "أصليًا"، نشأ من سحب بين النجوم قديمة. إن اكتشاف الماء الثقيل، باستخدام نسب النظائر الحساسة ($D_2O/H_2O$)، يثبت الأصل القديم للماء ويوفر حلقة مفقودة بين السحب والأقراص والمذنبات، وفي النهاية الكواكب." هذا الاكتشاف هو أول دليل مباشر على رحلة الماء بين النجوم من السحب إلى المواد التي تشكل الأنظمة الكوكبية، دون تغيير ودون تغيير.

## هل مياهنا أقدم من الشمس؟ علماء الفلك يجدون دليلاً في الجليد المحيط بنجم شاب

تمكن فريق بحثي بقيادة جامعة لايدن[1] في هولندا والمرصد الوطني لعلم الفلك الراديوي، ولأول مرة، من رصد جليد الماء شبه الثقيل حول نجم شاب شبيه بالشمس. في هذا الجليد، استُبدلت بعض ذرات الهيدروجين العادية بذرات الديوتيريوم، وهو نظير أثقل للهيدروجين. إحدى الطرق التي يستخدمها علماء الفلك لتحديد أصل الماء هي قياس نسبة الديوتيريوم فيه. وهي نسبة الماء الذي يحتوي على ذرة ديوتيريوم واحدة بدلًا من ذرة هيدروجين. لذا، بدلًا من $H_2O$، يكون الناتج HDO، والذي يُسمى أيضًا الماء شبه الثقيل. تشير النسبة العالية من الماء شبه الثقيل إلى أن الماء قد تشكل في بيئة شديدة البرودة، مثل السحب المظلمة البدائية من الغبار والجليد والغاز التي تولد منها النجوم.

في محيطاتنا والمذنبات والأقمار الجليدية، تصل نسبة الماء شبه الثقيل إلى جزيء واحد من بين آلاف جزيئات الماء. وهذا أعلى بعشر مرات تقريبًا مما هو متوقع بناءً على تركيب شمسنا. لذا، يفترض علماء الفلك أن بعض الماء في نظامنا الشمسي نشأ على هيئة جليد في السحب المظلمة، قبل مئات آلاف السنين من ولادة شمسنا. ولتأكيد هذه الفرضية، عليهم قياس نسبة الديوتيريوم في جليد الماء في مناطق تكوّن النجوم هذه. وقد رصد فريق دولي من علماء الفلك نسبة عالية من جليد الماء شبه الثقيل في غلاف نجمي أولي، وهو سحابة المادة التي تحيط بالنجم في مراحله الجنينية. وتعزز هذه النتائج فرضية أن بعض الماء في نظامنا الشمسي قد تشكّل قبل شمسنا وكواكبنا.

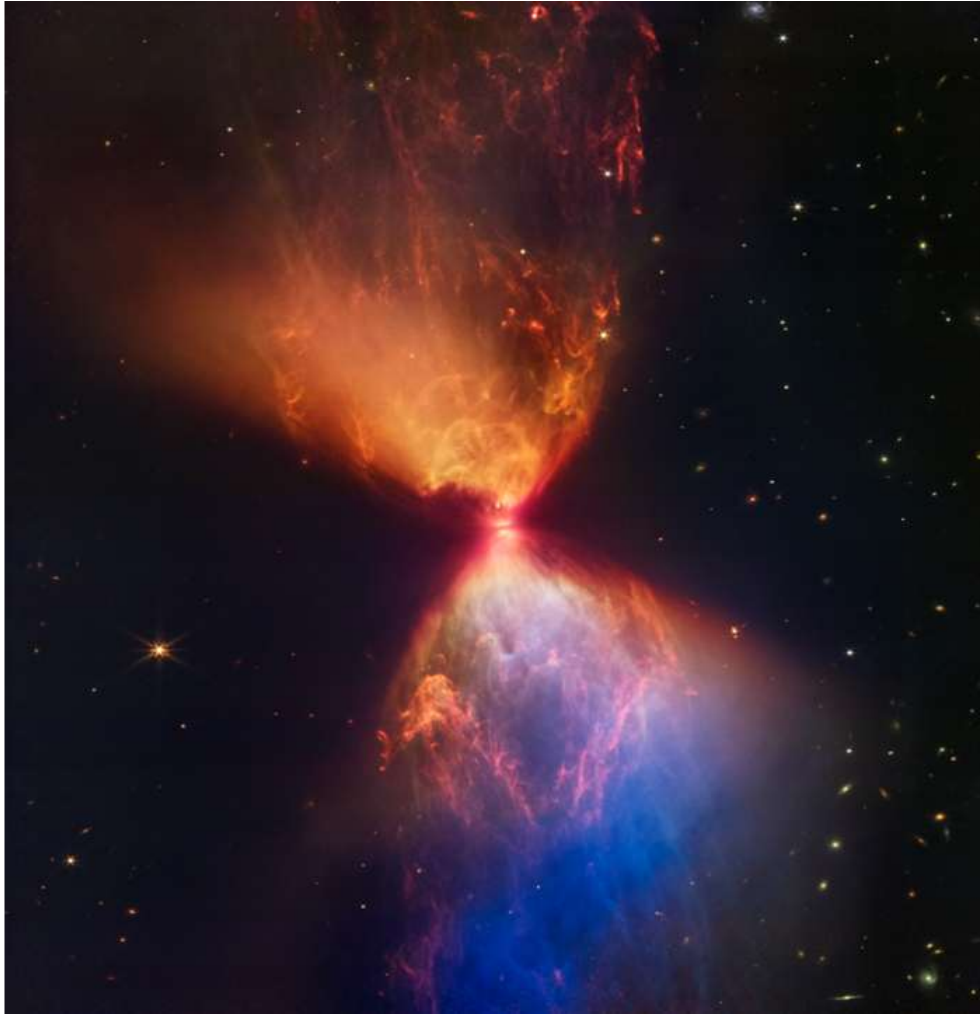
استخدم علماء الفلك تلسكوب جيمس ويب الفضائي. قبل إطلاقه، لم يكن بالإمكان قياس نسبة الديوتيريوم في الماء في مناطق تكوّن النجوم بدقة إلا في الحالة الغازية، حيث يمكن أن تتغير تركيبتها الكيميائية. تقول كاتي سلافيتشينسكا، طالبة الدكتوراه من جامعة ليدن (هولندا) التي قادت الدراسة: "الآن، وبفضل حساسية ويب غير المسبوقة، نرصد إشارة واضحة للغاية لجليد الماء شبه الثقيل باتجاه نجم أولي". النجم الأولي المعني هو IRS L1527، ويقع في كوكبة الثور على بُعد حوالي 460 سنة ضوئية من الأرض. يقول جون توبين، من المرصد الوطني لعلم الفلك الراديوي في فرجينيا (الولايات المتحدة الأمريكية)، والذي يرأس أحد برامج ويب المسؤولة

[1] ( https://www.universiteitleiden.nl/en/news/2025/06/is-our-water-older-than-the-sun-astronomers-find-clue-in-ice-around-young-star

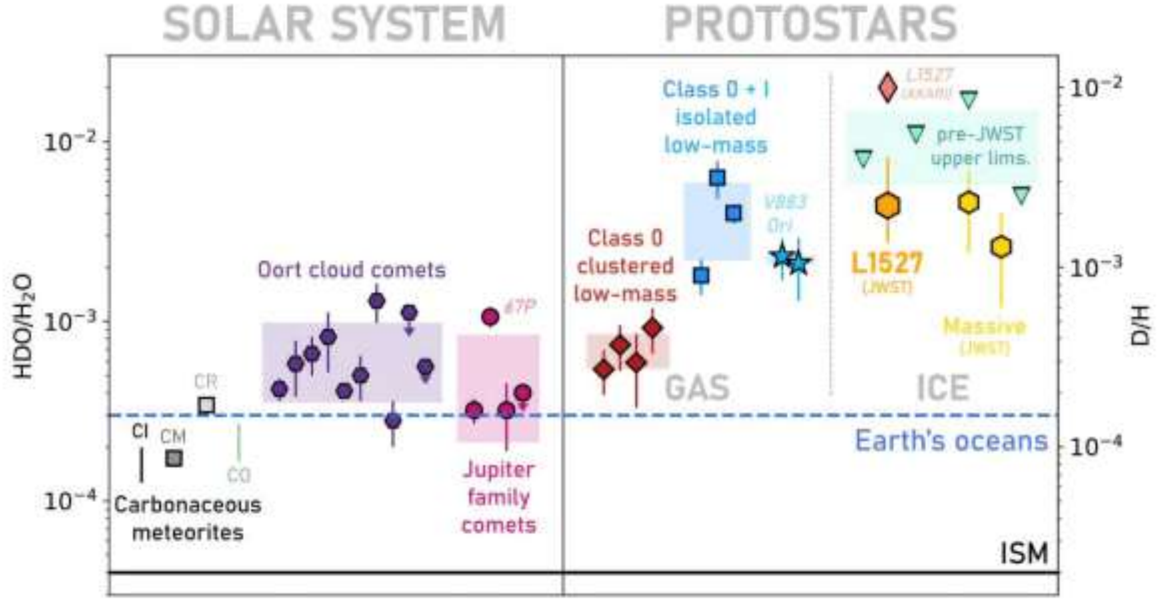
Katerina Slavicinska, Łukasz Tychoniec, María Gabriela Navarro, Ewine F. van Dishoeck, John J. Tobin, Martijn L. van Gelder, Yuan Chen, A. C. Adwin Boogert, W. Blake Drechsler, Henrik Beuther, HDO Ice Detected toward an Isolated Low-mass Protostar with JWST, The Astrophysical Journal Letters, Volume 986, Number 2, 2025

عن عمليات الرصد: "يشبه هذا النجم، من نواحٍ عديدة، ما نعتقد أن شمسنا كانت عليه عندما بدأت تتشكل". نسبة الديوتيريوم في الماء L1527 تُشابه إلى حد كبير نسبة بعض المذنبات، وكذلك القرص الكوكبي الأولي لنجم فتيّ أكثر تطورًا، مما يُشير إلى أصول كيميائية باردة وقديمة مماثلة للماء الموجود في جميع هذه الأجرام.

وتقول إيوين فان ديشويك، الأستاذة في علم الفلك بجامعة لايدن، والتي كرّست جزءًا كبيرًا من حياتها المهنية لتتبع مسار الماء عبر الفضاء: "يُضيف هذا الاكتشاف إلى الأدلة المتزايدة على أن معظم جليد الماء يقطع رحلته دون تغيير يُذكر من المراحل الأولى إلى الأخيرة لتكوّن النجوم".



صورة التقطها تلسكوب جيمس ويب الفضائي للنظام النجمي الأولي L1527 IRS. يقع النجم الأولي داخل سحابة من الغبار والغاز والجليد (بما في ذلك جليد الماء شبه الثقيل) التي تغذي نموه. ناسا/وكالة الفضاء الأوروبية/وكالة الفضاء الكندية/معهد علوم تلسكوب الفضاء




مقارنة نسب HDO/H2O المقاسة في أجرام بدائية مختلفة من النظام الشمسي، وفي اتجاه النجوم الأولية، في كلٍ من الحالة الجليدية والغازية. يُشار إلى نسبة HDO/H2O الجليدية للنجم L1527، المقاسة في هذه الدراسة باستخدام بيانات تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST)، بالسداسي البرتقالي الكبير. المصدر: اكتشاف جليد HDO باتجاه نجم أولي معزول منخفض الكتلة باستخدام تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST) - IOPscience

## توليد كميات هائلة من الماء أثناء تكوين الكواكب

دراسة جديدة نُشرت في مجلة Nature من قبل فريق من الولايات المتحدة وفرنسا (مؤسسة كارنيجي للعلوم، ومعهد الفيزياء العامة، وجامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس)، ومعهد فيزياء الأرض في باريس (جامعة باريس سيتي/المركز الوطني للبحث العلمي)[1].

أظهر الباحثون أن التفاعلات الكيميائية بين محيطات الصهارة والأغلفة الجوية البدائية الغنية بالهيدروجين يمكن أن تؤدي إلى تكوين الماء أثناء تشكل الكواكب. وتُلقي هذه النتائج ضوءًا جديدًا على أصل الماء على الأرض، وعلى إمكانية وجود حياة على عوالم أخرى. من بين أكثر من 6000 كوكب خارج المجموعة الشمسية تم اكتشافها حتى الآن، تُعدّ " الكواكب الشبيهة بنبتون " ، الأصغر من نبتون ولكنها أكبر كتلة من الأرض، الأكثر شيوعاً. ويجعلها تركيبها الداخلي، الذي يتكون من نواة صخرية محاطة بغلاف جوي كثيف من الهيدروجين، نماذج مثالية لدراسة كيفية تكوّن الماء من خلال التفاعلات العميقة بين الصخور والغازات. حتى الآن، استندت هذه الفرضية بشكل أساسي إلى نماذج نظرية. ولأول مرة، نجح الفريق في إعادة إنتاج هذه الظروف القاسية تجريبياً في مختبر الضغط العالي التابع لمعهد فيزياء الأرض (IPGP): تم ضغط السيليكات ذات التركيب الوشاحي إلى 600000 ضعف الضغط الجوي وتسخينها إلى أكثر من 4000 درجة مئوية في وجود الهيدروجين الجزيئي.

كشفت التجارب عن عمليتين رئيسيتين: ذوبان قوي للهيدروجين في الصهارة، والتكوين المباشر للماء من خلال اختزال أكسيد الحديد الموجود في السيليكات.

---

[1] ( https://www.ipgp.fr/en/news-and-agenda/news/how-do-planets-acquire-their-water/

F. Miozzi, A. Shahar, E. D. Young, J. Wang, A. Steele, S. Borensztajn, S. M. Vitale, E. S. Bullock, N. Wehr & J. Badro, (2025) Experiments reveal extreme water generation during planet formation, Nature volume 648, pages 551–555

**تفسير علمى كيف تم الفصل بين المياه تحت وفوق الجلد**

فى دراسة نشرتها مجلة The Astrophysical Journal الجمعية الفلكية الأمريكية [1] جاء فيها: تشير البيانات إلى أن معظم الكواكب الصخرية الخارجية ذات الفترة المدارية الأقل من 100 يوم ("الكواكب الصخرية الخارجية الساخنة") قد تشكلت ككواكب شبيهة بنبتون غنية بالغاز، ثم فقدت معظم أغلفةها، ولكن ما إذا كانت هذه الكواكب الصخرية الخارجية لا تزال تحتفظ بأغلفة جوية أم لا، يبقى غير معروف. وقد حددنا مسارًا يمكن من خلاله للكواكب الصخرية الخارجية التي تتراوح كتلتها بين 1–1.7 M⊕ (1–10 R⊕) ذات فترات مدارية تتراوح بين 10 و100 يوم أن تكتسب أغلفة جوية طويلة الأمد تتراوح ضغوطها بين 10 و2000 بار، وتكون غنية بالماء ($H_2O$) بمتوسط وزن جزيئي أكبر من 10. تتشكل هذه الأغلفة الجوية خلال تطور الكواكب من كواكب شبيهة بنبتون إلى كواكب صخرية خارجية. يتميز الماء الناتج عن اختزال أكاسيد الحديد في الصهارة السيليكاتية بذوبانه العالي في الصهارة، مما يشكل خزانًا مذابًا محميًا من الفقدان طالما استمر الغلاف الجوي الغني بالهيدروجين. يُساهم الحجم الكبير للخزان المذاب في حماية الغلاف الجوي من الماء ($H_2O$) من الفقدان بعد تشتت الهيدروجين (2H). في نموذجنا، يُعدّ الغلاف الجوي طويل الأمد، الذي يهيمن عليه الماء، نتيجة شائعة للتفاعل الفعال بين غلاف جوي مشتق من السديم (ذروة نسبة كتلة الغلاف الجوي 0.1-0.6% وزناً) والصهارة المؤكسدة (<5% وزناً من أكسيد الحديد الثنائي FeO)، يليه فقدان الغلاف الجوي. تتنبأ هذه الفكرة بأن معظم الكواكب الصخرية التي تتراوح فترات دورانها بين 10 و100 يوم، والتي يقع نصف قطرها ضمن نطاق 0.1–0.2 R⊕ من الحافة السفلية لوادي نصف القطر، لا تزال تحتفظ بأغلفة جوية من الماء ($H_2O$). يُمكن اختبار هذا التنبؤ قريباً باستخدام تلسكوب جيمس ويب James Webb الفضائي، وله آثار على تفسير بيانات الكواكب العملاقة الأرضية العابرة.

تدور معظم النجوم الشبيهة بالشمس حول كواكب خارجية صخرية ساخنة، وهي عوالم ذات فترة مدارية (p) أقل من 100 يوم، ونصف قطر $R < 1.7\ R_{\oplus}$ ، وكثافة تشير إلى أنها تتكون في الغالب من معادن الحديد والسيليكات. ويُعدّ السؤال "هل لهذه العوالم أغلفة جوية؟" بمثابة الحدّ الأقصى للبحوث الرصدية في مجال الكواكب الخارجية الصخرية. فعلى سبيل المثال، سيُصبح البحث عن أغلفة جوية ذات وزن جزيئي عالٍ على الكواكب الخارجية الصخرية الساخنة ممكنًا باستخدام تلسكوب جيمس ويب الفضائي. وتشير البيانات إلى

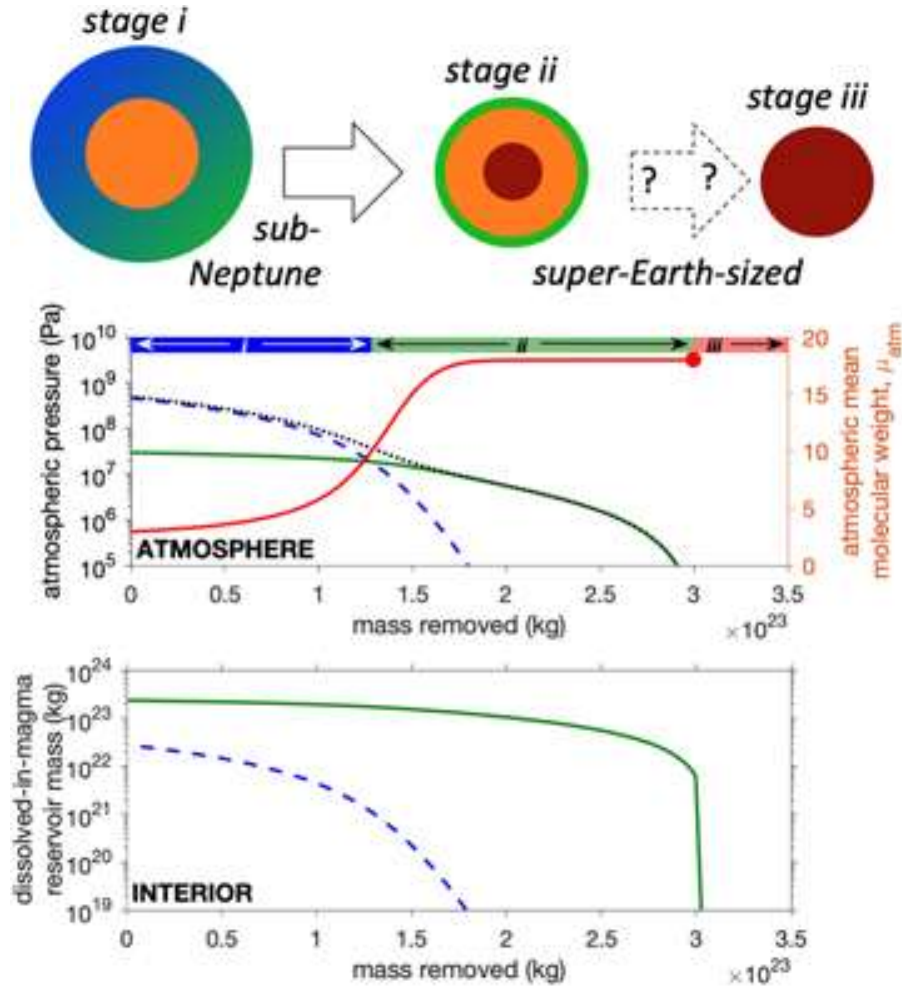
[1] )

أن حوالي 80% من الكواكب العملاقة الشبيهة بالأرض الساخنة قد تشكلت ككواكب شبيهة بنبتون، ذات أغلفة جوية سميكة مشتقة من السدم، تتكون من الهيدروجين الجزيئي (2H) فوق صهارة سيليكاتية، وأن غلاف الهيدروجين الجزيئي (نسبة كتلة الغلاف الجوي تصل إلى 1% من كتلة الكوكب) قد فُقد نتيجة فقدان الغلاف الجوي في الفضاء. نُعرّف هنا "الأرض العملاقة" بأنها كوكب ذو نصف قطر $1\ R_\oplus < R < 1.7\ R_\oplus$ ، و"شبه نبتون" بأنها كوكب ذو نصف قطر $1.8\ R_\oplus < R < 4\ R_\oplus$ . يشير الانتشار الواسع لعملية فقدان الغلاف الجوي القوية، القادرة على تقليص حجم الكوكب إلى النصف، إلى أن الكواكب العملاقة التي تشكلت كشبه نبتون لا تمتلك غلافًا جويًا مشتقًا من السديم اليوم. بعبارة أخرى، الرأي السائد هو أن رصد كوكب أرض عملاق صخري ذي غلاف جوي رقيق (أقل من 500 كم) مشتق من السديم يتطلب ضبطًا دقيقًا، إما لوقت توقف عملية فقدان الغلاف الجوي، أو لوقت الرصد بالنسبة لتطور الكوكب.

نستكشف في هذه الدراسة مسارًا لا يمنح الكواكب الصخرية أغلفة جوية إلا إذا كانت هذه الكواكب قد نشأت بأغلفة سميكة من الهيدروجين. وعلى وجه التحديد، نبحث في مسار يؤدي فيه تسرب الغلاف الجوي إلى تقطير نواتج التفاعلات الكيميائية بين الصهارة السيليكاتية والهيدروجين المشتق من السديم، مما ينتج عنه كواكب خارجية صخرية ساخنة ذات أغلفة جوية من الماء ($H_2O$) تتراوح ضغوطها بين 10 و2000 بار، وتدوم طويلًا. والمثير للدهشة، كما سنبين، أن عملية التقطير هذه تحدث حتى عندما يكون الهروب الجوي نفسه غير قابل للتجزئة.

تُظهر النتائج عالمًا بكتلة $M = 5\ M_\oplus$ يحتوي في البداية على صهارة $X_{FeO} = 11$ wt% بنسبة 11% وزنيًا، وهي نسبة مشابهة لمحتوى FeO في غلاف الأرض. ولتوليد هذه الحالة الأولية، أُضيف الهيدروجين (2H) إلى الكوكب النموذجي ضمن نموذجنا، وحدث تفاعل بين الصهارة والغلاف الجوي، مُكَوِّنًا الماء ($H_2O$). حُدِّدت كتلة الهيدروجين الأولية بحيث يكون ضغط الغلاف الجوي للنموذج (بعد تفاعل الصهارة والغلاف الجوي) 5 كيلوبار. النموذج الناتج لكوكب نبتون الفرعي $\mu_{atm} \approx 3, X_{FeO} = 6$ wt% ، ونصف قطر يُقارب $\sim 1.9\ R_\oplus$. تُعد الكواكب التي يبلغ نصف قطرها $\sim 1.9\ R_\oplus$ نادرة في تعداد الكواكب الخارجية، وهناك أدلة إحصائية قوية تُشير إلى أن ذلك يعود إلى فقدان الغلاف الجوي، مما يُؤدي إلى تكوين كواكب نصف قطرها $R < 1.7\ R_\oplus$.

فى الشكل الموضح أسفل، مثال على مخرجات النموذج. الصف العلوي: نظرة عامة على السيناريو المُنمذج: كوكب شبيه بنبتون بنواة كتلتها $5\ M_{\oplus}$ ، تحتوي في البداية على نسبة FeO مماثلة لتلك الموجودة في وشاح الأرض، ثم يُضاف إليها الهيدروجين حتى يصل ضغط الغلاف الجوي الأساسي إلى 5 kbar (مع توازن الصهارة والغلاف الجوي) (المرحلة الأولى). يُمثل التظليل الأزرق الهيدروجين الجوي، بينما يُمثل التظليل الأخضر الماء الجوي. يُمثل التظليل البرتقالي الصهارة السائلة، والتظليل الأحمر الصخور الصلبة. بعد ذلك، يفقد الكوكب غلافه الجوي بشكل كامل (غير مجزأ)، ويتطور الغلاف الجوي إلى غلاف جوي من الماء (المرحلة الثانية). لم يتم عرض النواة المعدنية الحديدية. اللوحات السفلية: خزانات الهيدروجين المقابلة (خطوط زرقاء متقطعة)، وخزانات الماء (خطوط خضراء)، والضغط الجوي الكلي (خط منقط)، ومتوسط الوزن الجزيئي للغلاف الجوي (خط أحمر) لهذا السيناريو. يمثل الشريط الأزرق ("i") المرحلة التي يهيمن عليها الهيدروجين ($H_2$)، ويمثل الشريط الأخضر ("ii") المرحلة التي يهيمن عليها الماء ($H_2O$)، ويمثل الشريط الأحمر ("iii") مرحلة الصخور العارية بعد فقدان الغلاف الجوي بالكامل. وتطول مرحلة الغلاف الجوي المائي ("ii") لأن الغلاف الجوي المائي مُخفف بواسطة مخزون كبير من الماء المذاب في الصهارة.




بفعل فقدان الغلاف الجوي، يتناقص سمك الغلاف الجوي النموذجي بسرعة من 5 كيلوبار إلى 200 بار. عند هذه النقطة، يكون الهيدروجين قد أُزيل بالكامل تقريبًا، ويصبح الغلاف الجوي مُهيمنًا عليه الماء. بعد ذلك، وعلى الرغم من استمرار فقدان الغلاف الجوي، يتباطأ معدل انخفاض الضغط الجوي بشكل كبير. ويعود ذلك إلى انبعاث الماء من الصهارة. يبقى الغلاف الجوي مُهيمنًا عليه الماء ومُخففًا (في هذه المحاكاة) عند ضغط يتراوح بين 10 و100 بار (مما يُعادل كتلة محيط أرضي من الماء) لفترة طويلة. لا يُستمد الماء من مواد متطايرة صلبة (معادن مُمَيَّأة أو جليد)، بل يُنتَج على الكوكب نفسه - ماء داخلي المنشأ. تبلغ الكتلة الإجمالية التي يجب إزالتها لإزالة المواد المتطايرة من الكوكب حوالي 10 أضعاف الكتلة القصوى للغلاف الجوي. تُزال معظم هذه الكتلة بينما يكون الكوكب بحجم كوكب أرضي عملاق، ولكنه مُحاط بالماء.

بالنسبة لنجم معين، تتطور الكواكب القريبة جدًا منه باتجاه اليمين في الشكل السابق. أما الكواكب البعيدة عن النجم فتبقى كعوالم مغلفة بغلاف من الهيدروجين الجزيئي (2H) ذات أنصاف أقطار كبيرة وكثافات

منخفضة. بينما تتحول الكواكب متوسطة البعد عن النجم إلى كواكب عملاقة أرضية مغلفة بالماء. تحدث مرحلة طويلة نسبيًا، ذات غلاف جوي غني بالماء ($H_2O$) بضغط يتراوح بين 10 و2000 بار، ضمن نطاق واسع من المعايير. وتقتصر هذه المرحلة على عمليات المحاكاة التي يكون فيها محتوى الماء في الغلاف الجوي $f_{atm} \gtrsim$ 0.6 wt%. ووفقًا للنماذج، غالبًا ما تبقى الكواكب التي يكون فيها محتوى الماء في الغلاف الجوي 0.6 $f_{atm} \gtrsim$ wt% ككواكب صغيرة الحجم (أقل من نبتون) ولا تتحول إلى كواكب عملاقة أرضية. أما الكواكب بحجم الأرض أو أكبر، فينبغي أن يكون محتوى أكسيد الحديد (FeO) في غلافها الأولي الخالي من المواد المتطايرة بضعة بالمئة وزنيًا على الأقل. يعود ذلك إلى أن السيليكون Si من الوشاح يذوب في لب الحديد Fe السائل بسهولة أكبر من الأكسجين الموجود في الوشاح، مما يُنتج فائضًا من الأكسجين في الوشاح يرتبط بالحديد. في الواقع، تبلغ نسبة FeO المولية على الأرض والزهرة والمريخ حوالي 0.1-0.2، وتشير القيود المفروضة على المواد الصخرية خارج المجموعة الشمسية من بيانات الأقزام البيضاء الملوثة إلى نسب FeO المولية بين 0.1 و0.5. وتُرجّح محتويات FeO في الوشاح التي تبلغ بضعة بالمئة وزنية أو أكثر وجود مرحلة مُغلّفة بالماء في نموذجنا.

تتراوح الكتلة الجوية النموذجية خلال مرحلة العالم المائي في محاكاة لكتلة 5 $M_\oplus$ تختلف المحاكاة بين عمليات المحاكاة من (1-16) × 10[21] kg (ما يُعادل 100-2000 بار). وتكون كمية الماء $H_2O$ التي يجب إزالتها لتجفيف العالم المائي بعد الوصول إلى مرحلة الضغط الجوي العالي ($\mu_{atm}$-) أكبر بكثير: 1-3 بالمئة وزنية من كتلة الكوكب (2–10) × 10[23] kg. ويعود ذلك إلى أن الماء شديد الذوبان في الصهارة.

في الختام، إذا كان تفاعل الصهارة مع الغلاف الجوي فعالاً في المراحل المبكرة من تاريخ كوكب شبيه بنبتون، فخلال تحوله إلى كوكب عملاق أرضي، يحدث أكثر من 80% من انخفاض حجم الغلاف الجوي بينما تبقى معظم الكتلة المتطايرة. وبالتالي، فإن الموقع أسفل وادي نصف القطر لا يعني بالضرورة أن الكوكب صخري عارٍ. بل يمكن للكواكب العملاقة الأرضية أن تحافظ على أغلفة جوية من الماء بسمك يتراوح بين 150 و500 كيلومتر (10-2000 بار)، مدعومة بخزان كبير من الماء المذاب في الصهارة. ويتكون هذا الماء من الهيدروجين المشتق من السديم والأكسجين المشتق من الصهارة. يكمن الضعف الرئيسي لهذه الفكرة في أننا لا نعرف ما إذا كان تفاعل الصهارة مع الغلاف الجوي فعالاً على الكواكب الشبيهة بنبتون الصغيرة. أما الميزة الرئيسية لفرضية العالم المائي الداخلي فهي إمكانية اختبارها قريباً.

## ناسا ويب تحدد وجود ماء متجمد في نظام نجمي شاب .. تفسير المياه فوق الجلد

أكد باحثون وجود جليد مائي بلوري في قرص من الحطام الغباري[1] يدور حول نجم شبيه بالشمس على بُعد 155 سنة ضوئية، وذلك باستخدام بيانات طيفية مفصلة من تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا. (يُشير مصطلح "جليد مائي" إلى تركيبه، إذ تُلاحَظ جزيئات متجمدة أخرى كثيرة في الفضاء، مثل جليد ثاني أكسيد الكربون، أو "الجليد الجاف"). في عام 2008، أشارت بيانات من تلسكوب سبيتزر الفضائي التابع لناسا، والذي توقف عن العمل، إلى احتمال وجود ماء متجمد في هذا النظام. وقال تشين شي Chen Xie، المؤلف الرئيسي للدراسة الجديدة وباحث مساعد في جامعة جونز هوبكنز Johns Hopkins في بالتيمور Baltimore، ميريلاند: "رصد ويب بوضوح ليس فقط جليدًا مائيًا، بل جليدًا مائيًا بلوريًا، وهو موجود أيضًا في مواقع مثل حلقات زحل والأجرام الجليدية في حزام كايبر في نظامنا الشمسي".

جميع جزيئات الماء المتجمد التي رصدها ويب مُقترنة بجزيئات غبار دقيقة منتشرة في جميع أنحاء القرص - أشبه بكرات ثلجية صغيرة جدًا. انتظر علماء الفلك هذه البيانات الحاسمة لعقود. تقول كريستين تشين، الباحثة المشاركة وعالمة الفلك في معهد علوم تلسكوب الفضاء في بالتيمور: "عندما كنت طالبة دراسات عليا قبل 25 عامًا، أخبرني مشرفي بوجود جليد في أقراص الحطام، ولكن قبل تلسكوب جيمس ويب الفضائي، لم تكن لدينا أجهزة حساسة بما يكفي لإجراء هذه الملاحظات". وتضيف: "الأمر الأكثر إثارة للدهشة هو أن هذه البيانات تبدو مشابهة لملاحظات التلسكوب الحديثة الأخرى لأجرام حزام كايبر في نظامنا الشمسي".

يُعدّ جليد الماء عنصرًا حيويًا في الأقراص المحيطة بالنجوم الفتية، فهو يؤثر بشكل كبير على تكوين الكواكب العملاقة، وقد يُنقل أيضًا بواسطة أجرام صغيرة كالمذنبات والكويكبات إلى الكواكب الصخرية المكتملة التكوين. والآن، بعد أن رصد الباحثون جليد الماء بواسطة تلسكوب جيمس ويب الفضائي، فقد فتحوا المجال أمام جميع الباحثين لدراسة كيفية حدوث هذه العمليات بطرق جديدة في العديد من الأنظمة الكوكبية الأخرى.

[1] ) https://science.nasa.gov/missions/webb/another-first-nasa-webb-identifies-frozen-water-in-young-star-system/




لأول مرة، أكد باحثون وجود جليد مائي بلوري في قرص من الحطام الغباري يدور حول نجم شبيه بالشمس، وذلك باستخدام تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا. وقد وُجد أن جميع المياه المتجمدة التي رصدها ويب مرتبطة بجزيئات غبار دقيقة منتشرة في جميع أنحاء القرص. وتركز معظم الجليد المائي المرصود في المناطق الأبرد والأبعد عن النجم. وكلما اقترب الباحثون من النجم، قلّ الجليد المائي الذي عثروا عليه. ناسا، وكالة الفضاء الأوروبية، وكالة الفضاء الكندية، رالف كروفورد (معهد علوم تلسكوب الفضاء)

النجم، المصنف تحت اسم HD 181327، أصغر بكثير من شمسنا. يُقدّر عمره بنحو 23 مليون سنة، مقارنةً بعمر الشمس البالغ 4.6 مليار سنة. يُعدّ هذا النجم أكبر كتلةً من الشمس، وأكثر حرارةً، مما أدى إلى تكوّن نظام نجمي أكبر قليلاً حوله. تؤكد رصدات تلسكوب جيمس ويب وجود فجوة كبيرة بين النجم وقرص الحطام المحيط به - وهي منطقة واسعة خالية من الغبار. في المناطق الأبعد، يُشبه قرص الحطام حزام كايبر في نظامنا الشمسي، حيث توجد الكواكب القزمة والمذنبات وقطع أخرى من الجليد والصخور (والتي تتصادم أحيانًا مع بعضها البعض). قبل مليارات السنين، كان حزام كايبر على الأرجح مشابهًا لقرص الحطام المحيط بهذا النجم. يقول تشين: "يُعدّ HD 181327 نظامًا نشطًا للغاية. تحدث تصادمات منتظمة ومستمرة في قرص الحطام المحيط به. عندما تتصادم هذه الأجسام الجليدية، تُطلق جزيئات دقيقة من جليد الماء المُغبر، وهي ذات حجم مثالي لرصدها بواسطة تلسكوب ويب".

لا يتوزع جليد الماء بالتساوي في هذا النظام، إذ يتركز معظمه في المناطق الأبرد والأبعد عن النجم. يقول شي: "تتكون المنطقة الخارجية من قرص الحطام من أكثر من 20% من جليد الماء". كلما اقترب الباحثون من مركز

القرص، قلّ ما وجدوه من جليد الماء. ففي منتصف قرص الحطام تقريبًا، رصد تلسكوب جيمس ويب حوالي 8% من جليد الماء. ومن المرجح أن جزيئات الماء المتجمدة تتشكل هنا بوتيرة أسرع قليلًا من وتيرة تحللها. أما في منطقة قرص الحطام الأقرب إلى النجم، فلم يرصد تلسكوب ويب أي جليد ماء تقريبًا. ومن المرجح أن ضوء النجم فوق البنفسجي يُبخر أقرب جزيئات جليد الماء. ومن المحتمل أيضًا أن تكون الصخور المعروفة بالكواكب الصغيرة قد "حبست" الماء المتجمد في باطنها، وهو ما لا يستطيع تلسكوب ويب رصده. رصد الباحثون النجم HD 181327 باستخدام مطياف الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIRSpec) التابع لتلسكوب جيمس ويب الفضائي، وهو جهاز فائق الحساسية لجزيئات الغبار الخافتة للغاية التي لا يمكن رصدها إلا من الفضاء.

## نصف مياه الأرض تشكلت قبل ولادة الشمس

الجمعية الأمريكية لتقدم العلوم AAAS قدمت تقريراً مفاده أنه قد يكون الماء أكثر انتشارًا في الأنظمة الكوكبية مما كان يُعتقد سابقًا[1] .فقد خلص فريق من الباحثين الذين يدرسون أصل الماء في نظامنا الشمسي إلى أن ما يصل إلى نصفه قد تشكل قبل ولادة الشمس نفسها، أي في سحابة الغبار والغاز التي كانت النواة الأولى لنظامنا الشمسي. إذا كان الماء يتشكل بوفرة في مثل هذه السحب، فمن المحتمل وجوده في كل مكان.

نظامنا الشمسي غني بالماء. فإلى جانب الأرض، يوجد الماء على القمر والمريخ وعطارد والمذنبات والأقمار الجليدية للكواكب العملاقة. ولكن من أين أتى؟ من المعروف أن الماء يتشكل في سحب الغاز والغبار في الوسط بين النجوم، والتي تتشكل منها الأنظمة الكوكبية، ولكن هل يتلاشى عندما تبدأ الشمس حديثة التكوين في ضخ الحرارة والضوء، ليتشكل مرة أخرى لاحقًا؟ أم أن هذا الماء البدائي ينجو من عملية تكوين النجوم ويبقى حولنا حتى اليوم؟

للإجابة على هذا السؤال، ركّز فريق بقيادة عالم الفلك إل. إلسيدور كليفز L. Ilsedore Cleeves من جامعة ميشيغان في آن أربور Ann Arbor، على الديوتيريوم، وهو شكل ثقيل من الهيدروجين تكوّن في الانفجار العظيم إلى جانب الهيدروجين العادي. يوجد حوالي 26 ذرة ديوتيريوم deuterium لكل مليون ذرة هيدروجين في الكون، لكنه أكثر وفرة بست مرات في الماء على الأرض وفي أجرام النظام الشمسي الأخرى. خلص العلماء إلى أنه عند تكوّن الماء، كان التفاعل الذي أنتج "الماء الثقيل" الغني بالديوتيريوم أسرع قليلاً من التفاعل الذي أنتج الماء العادي، مما أدى إلى زيادة نسبة الديوتيريوم في الماء.

لكنّ إثراء الديوتيريوم لا يحدث إلا في ظروفٍ مُحدّدة: يجب أن يكون الجو باردًا جدًا (بضع عشرات من الدرجات فوق الصفر المطلق فقط)، بالإضافة إلى الحاجة إلى الأكسجين ونوعٍ من الإشعاع المؤين لبدء التفاعل. كل هذه العناصر متوفرة في الوسط بين النجوم. الإشعاع المؤين هناك هو الأشعة الكونية، وهي جسيمات من مصادر

---

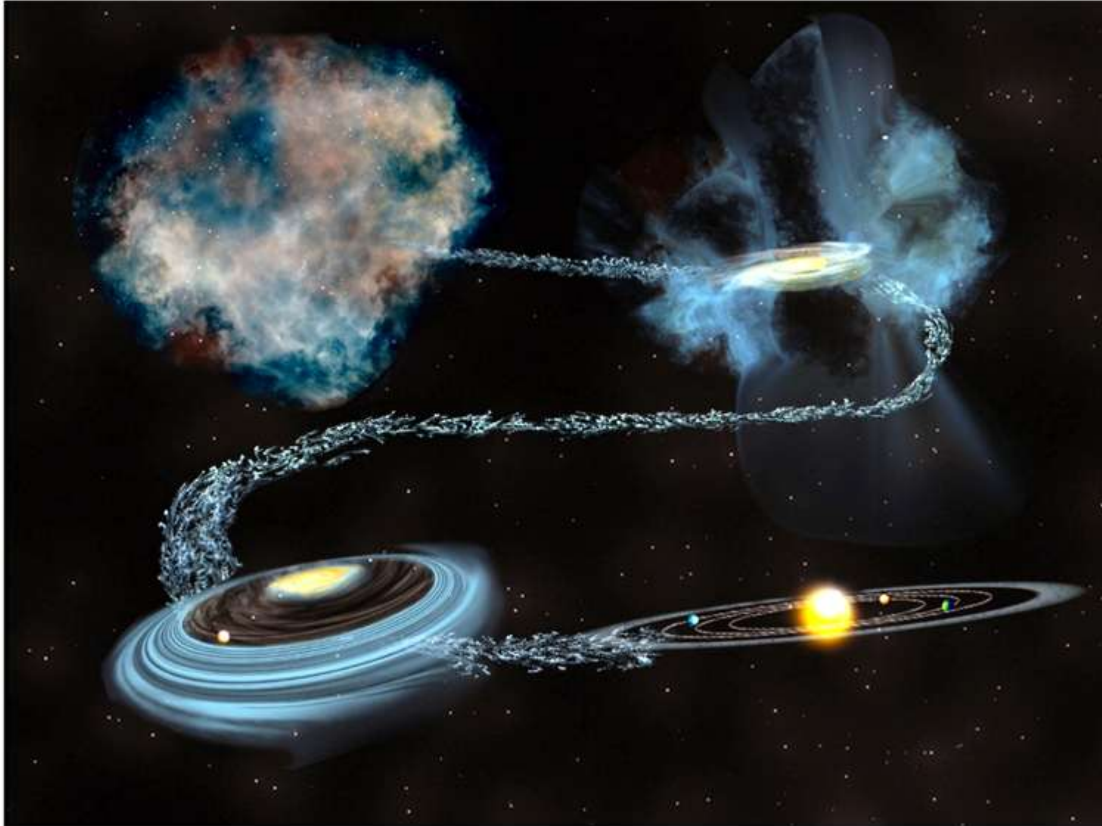
[1] ) Daniel Clery, 25 Sep 2014, https://www.science.org/content/article/half-earths-water-formed-sun-was-born

L. Ilsedore Cleeves et al. 2014. The ancient heritage of water ice in the Solar System. Science, vol. 345, no. 6204, pp. 1590-1593

Margot Leemker, John J. Tobin, Stefano Facchini, Pietro Curone, Pristine ices in a planet-forming disk revealed by heavy water, Nature Astronomy Volume 9 October 2025 P. 1486–1494

بعيدة تندفع عبر الفضاء بسرعاتٍ عالية. وقد رصد علماء الفلك وجود ماءٍ في الوسط بين النجوم غنيّ جدًا بالديوتيريوم، ما قد يجعله مصدرًا محتملاً لماء النظام الشمسي.

مع ذلك، يبقى التساؤل قائمًا حول ما إذا كان هذا الماء بين النجوم قادرًا على النجاة من عنف نشأة الشمس. وللإجابة على هذا السؤال، سعت كليفز وزملاؤها إلى تحديد ما إذا كانت تفاعلات تكوين الماء نفسها قد حدثت بعد تكوّن الشمس، في القرص الكوكبي الأولي من الغاز والغبار الذي تتكوّن منه الكواكب. من شأن هذا القرص أن يُوفّر درجات حرارة منخفضة وإمدادًا بالأكسجين تمامًا كما هو الحال في الوسط بين النجوم، ولكن هل سيكون هناك ما يكفي من الإشعاع المؤين؟



افترض الباحثون أن ما يصل إلى نصف مياه الأرض أقدم من الشمس. ومن المحتمل أنها تشكلت في السحابة الجزيئية الباردة التي نشأت منها مجموعتنا الشمسية

الجليد الذي تشكل في السحابة بين النجوم التي ولدت الشمس نجا من تلك العملية ليملأ محيطاتنا

مؤسسة العلوم الوطنية/معهد علم الفلك مرصد علم الفلك الوطني البريطاني NSF/AUI/NRAO

قام الفريق ببناء نموذج مفصل للعمليات الكيميائية التي تُنتج الماء في قرص كوكبي أولي. يتم صدّ معظم الأشعة الكونية بواسطة المجال المغناطيسي للنجم الفتيّ والجسيمات المتدفقة منه، ولكن توجد مصادر إشعاع أخرى: أشعة سينية من النجم ونظائر مشعة قصيرة العمر في القرص. وكما أفاد الباحثون اليوم في مجلة ساينس، فإن هذه المصادر الإشعاعية لا تُنتج الماء الثقيل بالسرعة الكافية. يقول كليفز: "وجدنا أن الماء الثقيل لم يتشكل بوفرة على مدى مليون سنة".

في الواقع، يُقدّر الفريق أن ما يصل إلى 50% من الماء الموجود على الأرض حاليًا ربما كان موجودًا قبل ولادة الشمس قبل 4.5 مليار سنة. وهذا خبر سار للأنظمة الكوكبية الأخرى. فالظروف في الوسط بين النجوم أكثر تجانسًا في الفضاء من تلك الموجودة في الأقراص الكوكبية الأولية، لذا من المرجح وجود الماء في كل مكان بانتظار تكوّن الكواكب. يقول كليفز: "مع ازدياد عدد الأنظمة الكوكبية المؤكدة، يُطمئننا أن الماء متوفر".

## هل الماء في الأنظمة الكوكبية قد تشكّل قبل الشمس؟

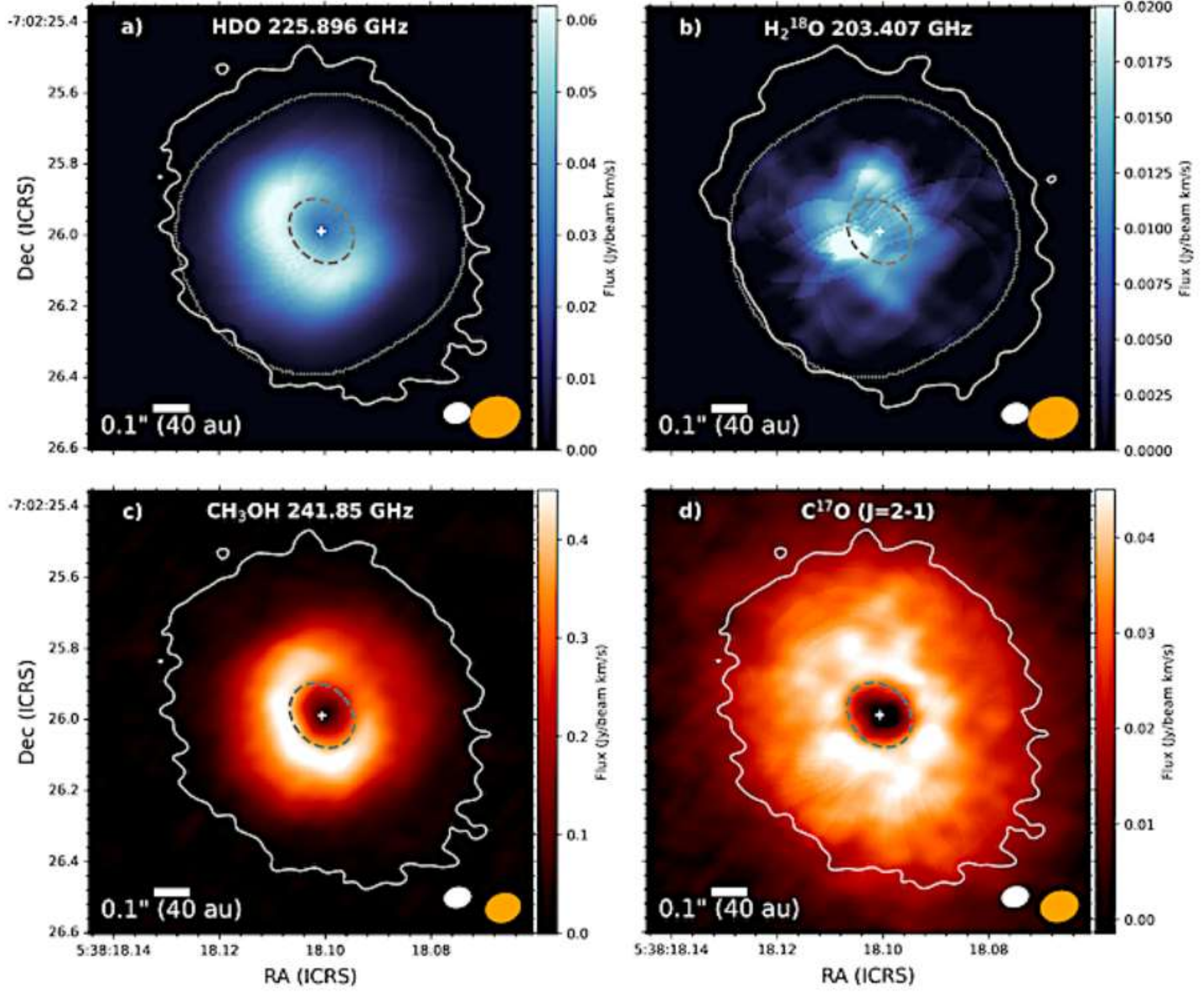
باستخدام مصفوفة أتاكاما Atacama الكبيرة (ALMA Millimeter/submillimeter)، رصد علماء الفلك في المرصد الأوروبي الجنوبي[1] (ESO European Southern Observatory ) وجود الماء الغازي في القرص المُشكِّل للكواكب حول النجم V883 Orionis. يحمل هذا الماء بصمة كيميائية تُفسِّر رحلة الماء من سحب الغاز المُشكِّلة للنجوم إلى الكواكب، وتُعزِّز فكرة أن الماء على الأرض أقدم من شمسنا.

يقول جون ج. توبين John J. Tobin، عالم الفلك في المرصد الوطني لعلم الفلك الراديوي National Radio Astronomy Observatory بالولايات المتحدة الأمريكية والمؤلف الرئيسي للدراسة المنشورة اليوم في مجلة Nature: "يمكننا الآن تتبُّع أصول الماء في نظامنا الشمسي إلى ما قبل تكوُّن الشمس".

تمَّ هذا الاكتشاف من خلال دراسة تركيب الماء في V883 Orionis، وهو قرص مُشكِّل للكواكب يقع على بُعد حوالي 1300 سنة ضوئية من الأرض. عندما تنهار سحابة من الغاز والغبار، يتكوَّن نجم في مركزها. وحول النجم، تتكوَّن مادة من السحابة أيضًا لتُشكِّل قرصًا. على مدى ملايين السنين، تتكتل المادة في القرص النجمي لتشكل المذنبات والكويكبات، ثم الكواكب في نهاية المطاف. استخدم توبين وفريقه مرصد ألما، الذي يُعد المرصد الأوروبي الجنوبي (ESO) شريكًا فيه، لقياس البصمات الكيميائية للماء ومساره من سحابة تشكل النجوم إلى الكواكب.

يتكون الماء عادةً من ذرة أكسجين واحدة وذرتي هيدروجين. درس فريق توبين نوعًا أثقل قليلًا من الماء، حيث استُبدلت إحدى ذرات الهيدروجين بالديوتيريوم deuterium، وهو نظير ثقيل للهيدروجين. ولأن الماء البسيط والماء الثقيل يتشكلان في ظروف مختلفة، يمكن استخدام نسبتهما لتحديد زمان ومكان تشكل الماء. على سبيل المثال، وُجد أن هذه النسبة في بعض مذنبات النظام الشمسي مشابهة لتلك الموجودة في الماء على الأرض، مما يشير إلى أن المذنبات ربما تكون قد نقلت الماء إلى الأرض.

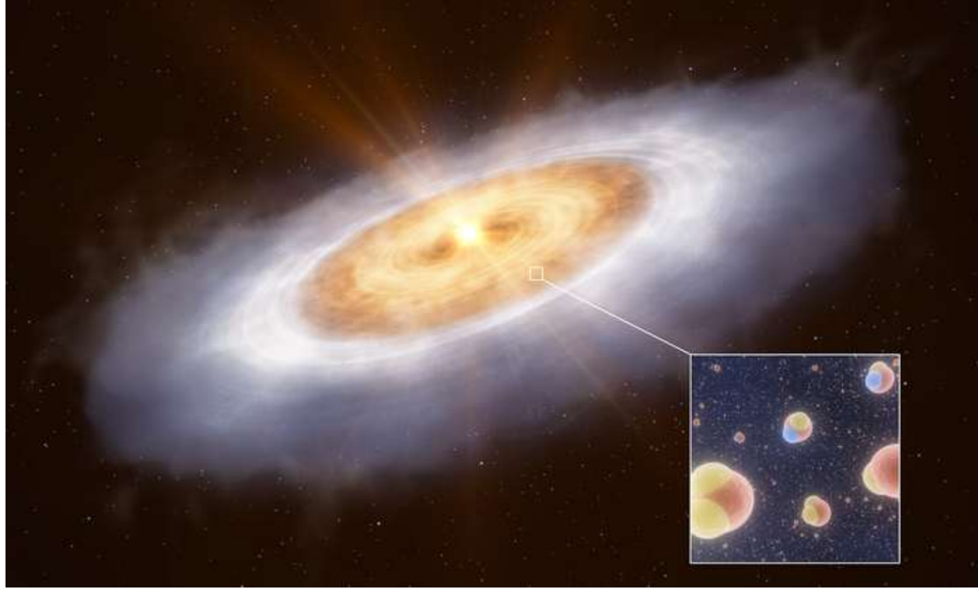
[1] ( Keith Cowing, https://astrobiology.com/2023/03/learning-more-about-the-source-of-the-water-in-our-solar-system.html




فى الشكل الموضح عاليه : صور الكثافة المتكاملة لخطوط الماء والجزيئات الأخرى في قرص 883V. نعرض خط HDO عند 225 جيجاهرتز (أ)، وخط $H_2$ 180 عند 203 جيجاهرتز (ب) و 3CH (ج) و 170C (د) كمقياس لوني، بينما يُظهر الخط الأبيض المحيط الخارجي لانبعاث طيف الغبار المستمر. يُظهر الخط المنقط في اللوحة (أ) المنطقة التي حسبت عليها صورة الكثافة المتكاملة باستخدام قناع كبلر. يشير الصليب الأبيض إلى موقع ذروة انبعاث الطيف المستمر وموقع النجم الأولي. ظهر خطا HDO و 180 $H_2$ انبعاثًا أصغر في امتداده القطري من انبعاث الطيف المستمر وانبعاث 170C. تظهر صورة 3CH (الميثانول) بنية وامتدادًا مشابهين جدًا لخطي HD و 180 2 يُظهر خط 170C بوضوح أكبر مدى انبعاث غاز القرص، نظرًا لانخفاض درجة حرارة التسامي فيه (حوالي 25 كلفن، مما يجعله يمتد إلى ما وراء انبعاث الطيف المتصل. ويعود الانخفاض المركزي في الانبعاث لجميع الخطوط إلى انبعاث الطيف المتصل الكثيف بصريا، والذي يضعف الانبعاث الجزيئي عند أنصاف أقطار أصغر من حوالي 40 وحدة فلكية (0.001). ويشار إلى مدى هذه المنطقة الكثيفة بصريا بالخط الرمادي السميك المتقطع في مركز كل صورة. ويكون الانخفاض أقل وضوحًا بالنسبة لخط 180 2 في اللوحة (ب) نظرًا لانخفاض نسبة الإشارة إلى الضوضاء فيه، وبعض التشويش في خريطة شدة إضاءته المتكاملة من خط مجاور. وتشير الأشكال البيضاوية في الزاوية اليمنى السفلى إلى دقة رصد الخطوط (البرتقالى حوالى 0.100) وانبعاث الطيف المتصل (الأبيض حوالى 0.0008) – ESO/ALMA

يُظهر هذا الرسم التخيلي قرص تكوّن الكواكب حول النجم V883 Orionis. في الجزء الخارجي من القرص، يتجمد الماء على شكل جليد، ولذلك يصعب رصده. يؤدي انفجار طاقة من النجم إلى تسخين القرص الداخلي إلى درجة حرارة يصبح فيها الماء غازيًا، مما يُمكّن علماء الفلك من رصده. تُظهر الصورة المُدرجة نوعي جزيئات الماء المدروسة في هذا القرص: الماء العادي، الذي يحتوي على ذرة أكسجين واحدة وذرتي هيدروجين، ونوع أثقل حيث استُبدلت ذرة هيدروجين واحدة بالديوتيريوم، وهو نظير ثقيل للهيدروجين. حقوق الصورة: ESO/L. Calçada

لقد رُصدت سابقًا رحلة الماء من السحب إلى النجوم الفتية، ثم لاحقًا من المذنبات إلى الكواكب، ولكن حتى الآن كانت الصلة بين النجوم الفتية والمذنبات مفقودة. يقول توبين: "يُمثل V883 Orionis الحلقة المفقودة في هذه الحالة". "يتشابه تركيب الماء في القرص إلى حد كبير مع تركيب الماء في المذنبات في نظامنا الشمسي. وهذا يؤكد فكرة أن الماء في الأنظمة الكوكبية قد تشكل قبل مليارات السنين، قبل الشمس، في الفضاء بين النجوم، وقد ورثته كل من المذنبات والأرض دون تغيير يُذكر".



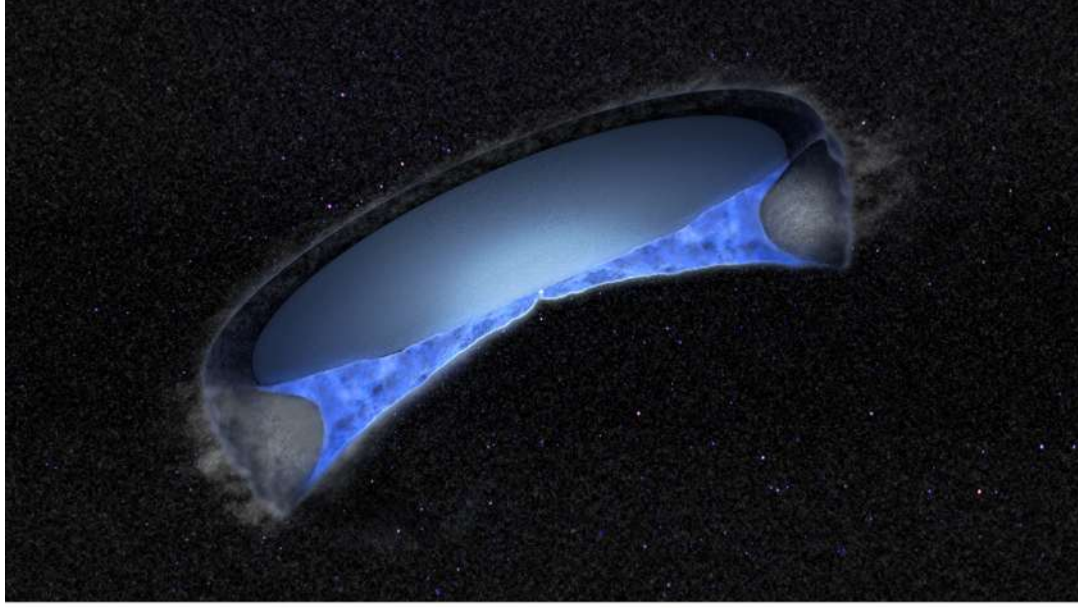
لكن رصد هذا الماء كان صعبًا. تقول مارغوت ليمكر Margot Leemker، الباحثة المشاركة في الدراسة وطالبة الدكتوراه في مرصد لايدن بهولندا: "معظم الماء في الأقراص التي تتشكل فيها الكواكب يكون متجمدًا على شكل جليد، لذا فهو عادةً ما يكون مخفيًا عن أنظارنا". يمكن رصد الماء الغازي بفضل الإشعاع المنبعث من الجزيئات أثناء دورانها واهتزازها، لكن الأمر يصبح أكثر تعقيدًا عندما يكون الماء متجمدًا، حيث تكون حركة الجزيئات

أكثر تقييدًا. يمكن العثور على الماء الغازي بالقرب من مركز الأقراص، بالقرب من النجم، حيث يكون أكثر دفئًا. ومع ذلك، فإن هذه المناطق القريبة مخفية بواسطة قرص الغبار نفسه، كما أنها صغيرة جدًا بحيث لا يمكن تصويرها بواسطة تلسكوباتنا. لحسن الحظ، أظهرت دراسة حديثة أن قرص نجم الجبار 883V ساخن بشكل غير عادي. ويعزو توبين ذلك إلى انفجار هائل للطاقة من النجم، مما يؤدي إلى تسخين القرص "إلى درجة حرارة يصبح عندها الماء غازًا بدلًا من الجليد، وهو ما يُمكّننا من رصده".

استخدم الفريق مرصد ألما، وهو عبارة عن مجموعة من التلسكوبات الراديوية في شمال تشيلي، لرصد الماء الغازي في قرص 883V أوريونيس. وبفضل حساسيته وقدرته على تمييز أدق التفاصيل، تمكنوا من رصد الماء وتحديد تركيبه، بالإضافة إلى رسم خريطة لتوزيعه داخل القرص. ومن خلال عمليات الرصد، وجدوا أن هذا القرص يحتوي على ما لا يقل عن 1200 ضعف كمية الماء الموجودة في جميع محيطات الأرض[1].

بيئة ولادة V883 Ori مقارنةً بالشمس والنجوم الأولية الأخرى: تمت مقارنة V883 Ori بالنجوم الأولية من الفئة 0 والمذنبات والماء في محيطات الأرض في محاولة لتحديد ما إذا كان هناك تسلسل تطوري في نسب $HDO:H_2O$. ومع ذلك، نعلم بالفعل أن V883 Ori قد تشكل في بيئة مختلفة عن الشمس/المجموعة الشمسية والنجوم الأولية الأخرى من الفئة 0. يتشكل V883 Ori داخل سحابة Orion الجزيئية العملاقة A، ويبعد حوالي 10 فرسخ فلكي عن العنقود/السديم الرئيسي، بينما يبعد أقرب نجم أولي حوالي 0.4 فرسخ فلكي: كلا القياسين بمسافات إسقاطية، وبالتالي فهو معزول نسبيًا داخل Orion. على النقيض من ذلك، تأتي النجوم الأولية من الفئة 0 ذات نسب $HDO:H_2O$ المقاسة من مزيج من النجوم المعزولة والنجوم الأولية داخل عناقيد صغيرة، وتتميز النجوم الأولية المعزولة من الفئة 0 بنسب $HDO:H_2O$ أعلى بشكل منهجي. نسبة $HDO:H_2O$ في V883 Ori هي الأقرب إلى تلك الموجودة في النجوم الأولية المعزولة من الفئة 0. قد يكون هذا منطقيًا نظرًا لعزلتها النسبية، لكن النجوم الأولية المعزولة تتشكل في نوى معزولة تمامًا، وليست جزءًا من سحابة جزيئية أكبر، على عكس V883 Ori. لا يزال سبب ارتفاع نسب $HDO:H_2O$ في الأنظمة المعزولة غير معروف، ولكن يبقى أن نرى ما إذا كان الفرق بين النجوم الأولية المعزولة والمتجمعة سيظل قائمًا مع عينات أكبر.

[1] John J. Tobin, Merel L. R. van 't Hoff, Margot Leemker, Ewine F. van Dishoeck, Teresa Paneque-Carreño, Kenji Furuya, Daniel Harsono, Magnus V. Persson, L. Ilsedore Cleeves, Patrick D. Sheehan & Lucas Cieza, Deuterium-enriched water ties planet-forming disks to comets and protostars, Nature volume 615, P. 227–230 (2023)

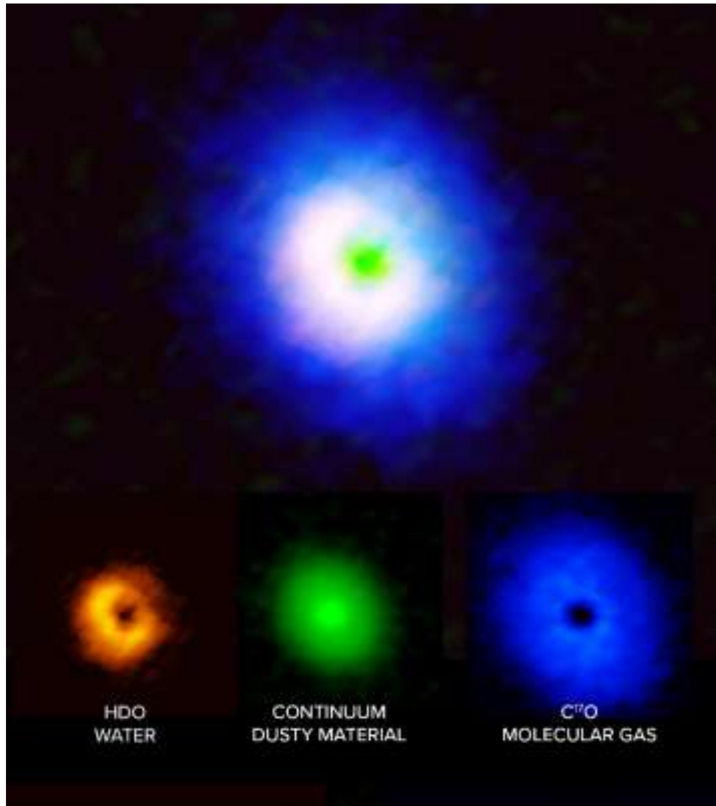


يعدّ V883 Ori نجمًا أوليًا فريدًا من نوعه، إذ تبلغ درجة حرارته حدًا كافيًا لتحويل الماء في قرصه المحيط به إلى غاز، مما يُتيح لعلماء الفلك الراديوي تتبّع أصول هذا الماء. وقد وفّرت رصدات جديدة باستخدام مصفوفة أتاكاما Atacama الكبيرة (ALMA) أول تأكيد على أن الماء في نظامنا الشمسي قد يكون مصدره نفس مصدر الماء في الأقراص المحيطة بالنجوم الأولية في أماكن أخرى من الكون

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

الماء جزيء أساسي في عملية تكوين النجوم والكواكب، فهو ضروري لتحفيز نمو المواد الصلبة وتكوين الكويكبات داخل الأقراص. مع ذلك، لم يتم تحديد خط تجمد الماء ونسبة HDO:$H_2O$ داخل الأقراص الكوكبية الأولية بدقة، لأن الماء لا يتسامى إلا عند حوالي K160 ، مما يعني أن معظمه يتجمد على حبيبات الغبار وأن أنصاف أقطار خط تجمد الماء أقل من AU10 وحدات فلكية. يخضع النجم الأولي الشبيه بالشمس V883 Ori ($M_* = 1.3\ M_\odot$) لانفجار تراكمي، مما يزيد من لمعانه إلى حوالي $200 L_\odot$ ، وقد أشارت الملاحظات السابقة إلى أن نصف قطر خط تجمد الماء فيه يتراوح بين 40 و120 وحدة فلكية. هنا، نُبلغ عن الكشف المباشر عن الماء في الحالة الغازية (HDO و$H_2O$) من قرص V883 Ori. قمنا بقياس نصف قطر خط تجمد الماء في المستوى المتوسط للقرص، والذي بلغ حوالي 80 وحدة فلكية، وهو ما يُقارب حجم حزام كايبر، ورصدنا وجود الماء حتى نصف قطر يبلغ حوالي 160 وحدة فلكية. ثم قمنا بقياس نسبة HDO:$H_2O$ في القرص، فوجدناها $(2.26 \pm 0.63) \times 10^{-3}$ . هذه النسبة تُقارن بنسبها في الأغلفة النجمية الأولية والمذنبات، وتتجاوز نسبة محيطات الأرض بمقدار $3.1\sigma$. نستنتج من ذلك أن الأقراص ترث الماء مباشرةً من سحابة تكوّن النجوم، وأن هذا الماء يندمج في الأجسام الجليدية الكبيرة، مثل المذنبات، دون حدوث تغييرات كيميائية كبيرة.

من المحتمل أن الشمس والنظام الشمسي قد تشكلا في عنقود ضمن سحابة جزيئية عملاقة، ربما كانت مشابهة لسحابة الجبار. مع ذلك، تشير القيود الديناميكية المتاحة لتطور النظام الشمسي إلى أن بيئة تشكله كانت أقرب إلى العنقود الرئيسي أو داخله. وبالتالي، فإن V883 Ori لا يتشكل في ظروف مماثلة تمامًا لتلك التي سادت في النظام الشمسي المبكر. مع ذلك، لا تزال مقارنة قياسات V883 Ori بالمذنبات داخل المجموعة الشمسية والأرض ذات أهمية بالغة، نظرًا لأنها تمثل القياسات الوحيدة المتاحة لأجرام أكثر تطورًا. علاوة على ذلك، إذا كان الماء موروثًا دون تغيير يُذكر من مرحلة السحابة الجزيئية الباردة، فإن حقيقة تشكل كل من الشمس/المجموعة الشمسية وV883 Ori داخل سحب جزيئية عملاقة تشير إلى أنه من المعقول مقارنة نسب HDO:H2O في هذه الأنظمة.




أثناء بحثهم عن أصول الماء في نظامنا الشمسي، ركز العلماء على النجم الأولي الفريد V883 Orionis، الذي يقع على بُعد 1305 سنة ضوئية من الأرض. على عكس النجوم الأولية الأخرى، فإن القرص المحيط بـ V883 Orionis ساخن بدرجة كافية لتحويل الماء فيه من جليد إلى غاز، مما مكّن العلماء من دراسة تركيبه باستخدام التلسكوبات الراديوية مثل تلك الموجودة في مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA).

بالشكل كشفت عمليات الرصد الراديوي للنجم الأولي عن وجود الماء (باللون البرتقالي)، وطيف متصل من الغبار (باللون الأخضر)، والغاز الجزيئي (باللون الأزرق)، مما يشير إلى أن الماء الموجود على هذا النجم الأولي يشبه إلى حد كبير الماء الموجود على الأجرام في نظامنا الشمسي، وقد يكون له أصول مماثلة.

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), J. Tobin, B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

باستخدام مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA)، رصد علماء الفلك وجود الماء الغازي في القرص المُشكِّل للكواكب حول النجم V883 Orionis. يحمل هذا الماء بصمة كيميائية تُفسِّر مسار الماء من سحب الغاز المُشكِّلة للنجوم إلى الكواكب، وتُعزِّز فكرة أن الماء على الأرض أقدم من شمسنا.

تمَّ هذا الاكتشاف من خلال دراسة تركيب الماء في V883 Orionis، وهو قرص مُشكِّل للكواكب يقع على بُعد حوالي 1300 سنة ضوئية من الأرض. عندما تنهار سحابة من الغاز والغبار، يتكوَّن نجم في مركزها. حول النجم، تتكوَّن المادة من السحابة أيضًا لتُشكِّل قرصًا. على مدار بضعة ملايين من السنين، تتكتَّل المادة في القرص لتُشكِّل المذنبات والكويكبات، وفي النهاية الكواكب. استخدم توبين وفريقه مصفوفة ALMA، التي يُعدُّ المرصد الأوروبي الجنوبي (ESO) شريكًا فيها، لقياس البصمات الكيميائية للماء ومساره من سحابة تكوين النجوم إلى الكواكب.

يتكون الماء عادةً من ذرة أكسجين واحدة وذرتي هيدروجين. درس فريق توبين نوعًا أثقل قليلًا من الماء، حيث استُبدلت إحدى ذرات الهيدروجين بالديوتيريوم، وهو نظير ثقيل للهيدروجين. ولأن الماء البسيط والماء الثقيل يتشكلان في ظروف مختلفة، يمكن استخدام نسبتهما لتحديد زمان ومكان تكوّن الماء. على سبيل المثال، وُجد أن هذه النسبة في بعض مذنبات النظام الشمسي مشابهة لتلك الموجودة في الماء على الأرض، مما يشير إلى أن المذنبات ربما تكون قد نقلت الماء إلى الأرض.

لقد رُصدت سابقًا رحلة الماء من السحب إلى النجوم الفتية، ثم لاحقًا من المذنبات إلى الكواكب، ولكن حتى الآن، كانت الصلة بين النجوم الفتية والمذنبات غائبة. يقول توبين: "يُمثل V883 Orionis الحلقة المفقودة في هذه الحالة. فتركيب الماء في قرصه يُشابه إلى حد كبير تركيب الماء في المذنبات في نظامنا الشمسي. وهذا يُؤكد فكرة أن الماء في الأنظمة الكوكبية قد تشكّل منذ مليارات السنين، قبل الشمس، في الفضاء بين النجوم، وقد ورثته كل من المذنبات والأرض، دون تغيير يُذكر".

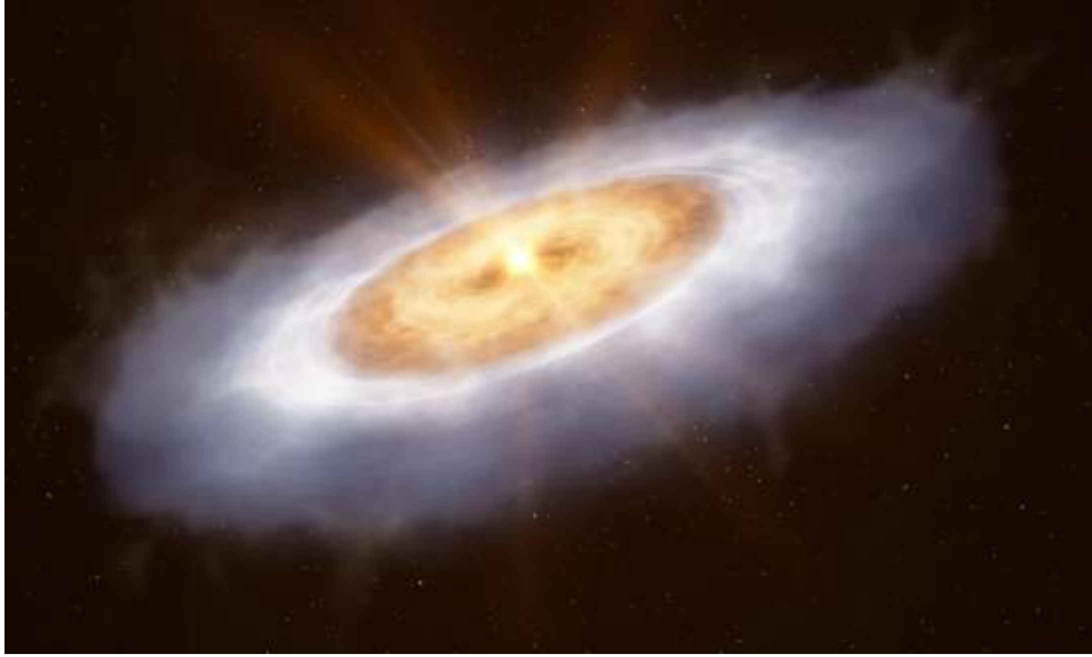


يوضح هذا الرسم التخطيطي كيف تنهار سحابة من الغاز لتشكل نجمًا محاطًا بقرص، ومنه سيتشكل نظام كوكبي في نهاية المطاف. حقوق الصورة: ESO/L. Calçada

لكن رصد هذا الماء كان صعبًا. تقول مارغوت ليمكر، طالبة الدكتوراه في مرصد لايدن بهولندا، والمؤلفة المشاركة في الدراسة: "معظم الماء في الأقراص التي تتشكل فيها الكواكب مُتجمد على شكل جليد، لذا فهو عادةً ما يكون مخفيًا عن أنظارنا". يمكن رصد الماء الغازي بفضل الإشعاع المنبعث من جزيئاته أثناء دورانها واهتزازها، إلا أن هذه العملية تصبح أكثر تعقيدًا عندما يكون الماء متجمدًا، حيث تكون حركة الجزيئات أكثر تقييدًا. يتواجد الماء الغازي في مركز الأقراص، بالقرب من النجم، حيث تكون درجة الحرارة أعلى. مع ذلك، فإن هذه المناطق القريبة محجوبة بقرص الغبار نفسه، كما أنها صغيرة جدًا بحيث لا يمكن تصويرها بواسطة تلسكوباتنا.

لحسن الحظ، أظهرت دراسة حديثة أن قرص V883 Orionis ساخن بشكل غير عادي. يقول توبين: "يؤدي انفجار هائل للطاقة من النجم إلى تسخين القرص، "إلى درجة حرارة يصبح عندها الماء غازًا بدلًا من الجليد، مما يُمكّننا من رصده". استخدم الفريق مرصد ألما، وهو عبارة عن مجموعة من التلسكوبات الراديوية في شمال تشيلي، لرصد الماء الغازي في V883 Orionis. وبفضل حساسيته وقدرته على تمييز أدق التفاصيل، تمكنوا من

رصد الماء وتحديد تركيبه، بالإضافة إلى رسم خريطة لتوزيعه داخل القرص. من خلال الملاحظات، وجدوا أن هذا القرص يحتوي على ما لا يقل عن 1200 ضعف كمية الماء الموجودة في جميع محيطات الأرض[1].



يُظهر هذا الرسم التخيلي قرص تكوّن الكواكب حول النجم V883 Orionis. في الجزء الخارجي من القرص، يتجمد الماء على شكل جليد، ولذلك يصعب رصده. يؤدي انفجار طاقة من النجم إلى تسخين القرص الداخلي إلى درجة حرارة يصبح فيها الماء غازيًا، مما يُمكّن علماء الفلك من رصده. حقوق الصورة: ESO/L. Calçada

[1] ( https://scitechdaily.com/astronomers-discover-missing-link-water-on-earth-is-even-older-than-our-sun/

## نموذج تكوين الماء في مرحلة السديم للمذنب P/Churyumov-Gerasimenko67

تتكون غلافات المذنبات من مزيج من الغاز والغبار المغطى بالجليد[1]. وتؤدي العمليات التي تحدث على سطح الغلاف وداخله إلى تغيير تركيبة الجليد على حبيبات الغبار مقارنةً بتركيبة الجليد في النواة. ومع تبخر الجليد على حبيبات الغبار، تتغير تركيبة الغلاف المحلي. وقد رصدت مركبة روزيتا سابقًا المذنب P67/تشوريوموف-جيراسيمينكو، مسجلةً واحدة من أعلى قيم نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) بين المذنبات. ومع ذلك، تُظهر إعادة تحليل أكثر من 4000 قياس لنظائر الماء خلال المهمة بأكملها أن الغبار يزيد بشكل ملحوظ من نسبة D/H المحلية. وتقترب نسبة النظائر المقاسة على مسافة من النواة، حيث يكون الغاز مختلطًا جيدًا، من النسبة الأرضية، كما هو الحال في مذنبات أخرى من عائلة المشتري. ولانخفاض نسبة D/H هذه آثار مهمة على فهم تكوين المذنبات ودورها في نقل الماء إلى الأرض.

يُعدّ تحديد الظروف السائدة داخل السديم الشمسي الأولي (PSN) وقت تكوّن الكواكب من أهم أولويات مجتمع علوم الكواكب. هذه خطوة أولى نحو فهم توزيع الماء في النظام الشمسي، لما لها من آثار على أصل الحياة على الأرض وإمكانية وجود حياة في أماكن أخرى. ومن الخطوات الحاسمة لفهم هذا التوزيع تحديد كيفية اختلاف تركيب المكونات الجليدية الأساسية، بما في ذلك المذنبات والأجرام العابرة لنبتون (TNOs) والقناطير والأقمار الجليدية للكواكب العملاقة، تبعًا لمكان تكوّنها.

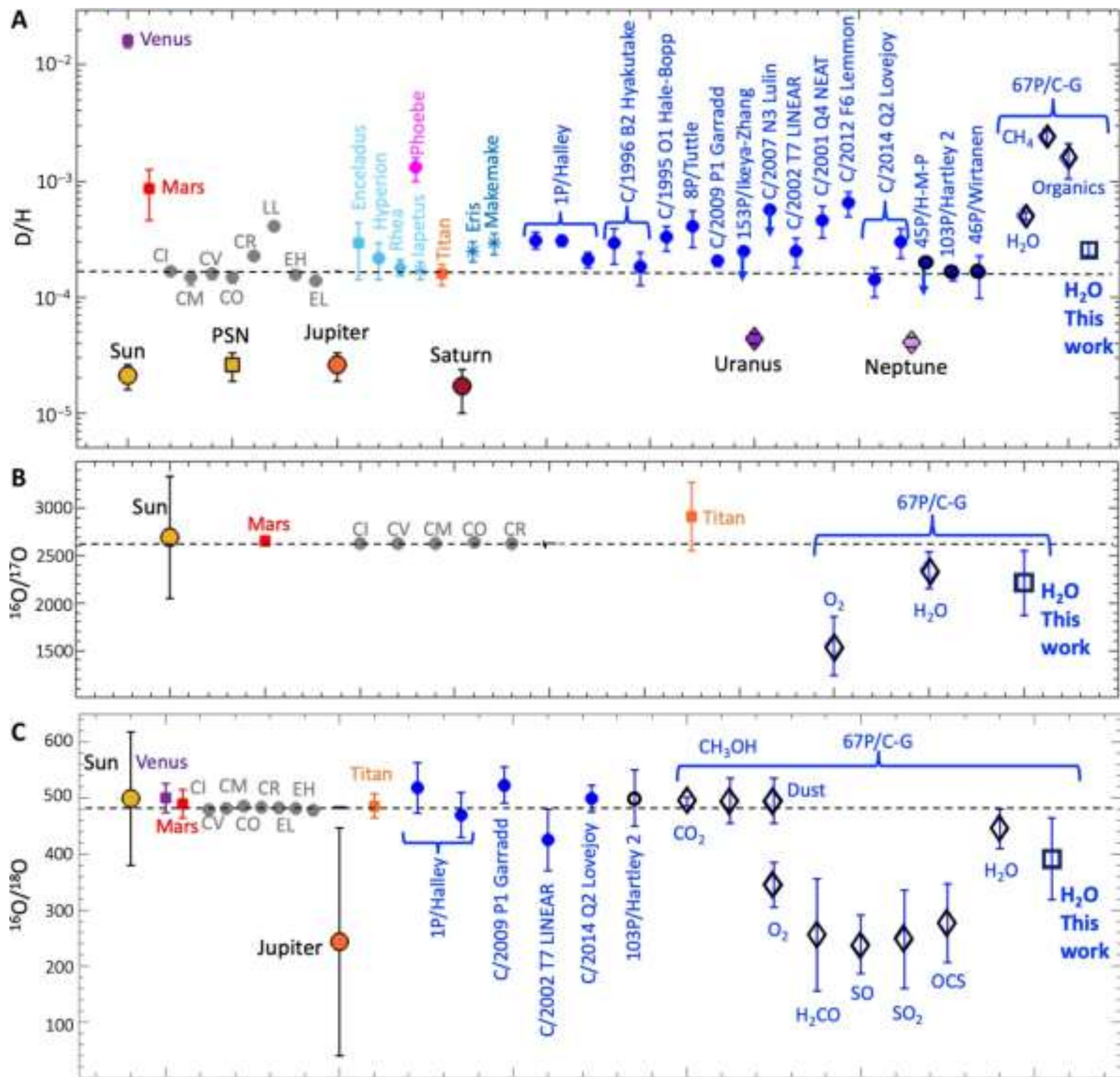
توفر نسب نظائر الماء في الكواكب وبقايا المكونات الأساسية للكواكب أداة فعّالة لرسم خريطة تركيب الجليد في النظام الشمسي. وتُعدّ نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) ذات أهمية خاصة. قبل تكوّن الشمس، سمحت درجات الحرارة المنخفضة جدًا في النواة ما قبل النجمية بتجميد معظم المواد المتطايرة وتكثفها على شكل حبيبات. وأدى هذا التكثف إلى تكوين جليد غني جدًا بالديوتيريوم. بعد تكوّن الشمس، تبخّر الماء من هذه الحبيبات في السديم الشمسي الأولي وتوازن مع الهيدروجين. أدّت درجات الحرارة المرتفعة في المنطقة الداخلية للقرص إلى نسبة ديوتيريوم/هيدروجين في الماء مساوية لقيمة السديم الشمسي الأولي. مع ازدياد المسافة عن الشمس، أدّى انخفاض درجة حرارة السديم الشمسي الأولي وكثافته إلى تقليل كفاءة التبادل النظائري، مما سمح بحفظ كمية أكبر من الديوتيريوم/الهيدروجين المُخصّب في البداية في جليد الماء. يسمح هذا التباين مع

---

[1] Kathleen E. Mandt, Jacob Lustig-Yaeger, Adrienn Luspay-Kuti, Peter Wurz, Dennis Bodewits,Stephen A. Fuselier, Olivier Mousis, Steven M. Petrinec, Karlheinz J. Trattner, A nearly terrestrial D/H for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Science Advances, Volume 10, Issue 46Nov 2024

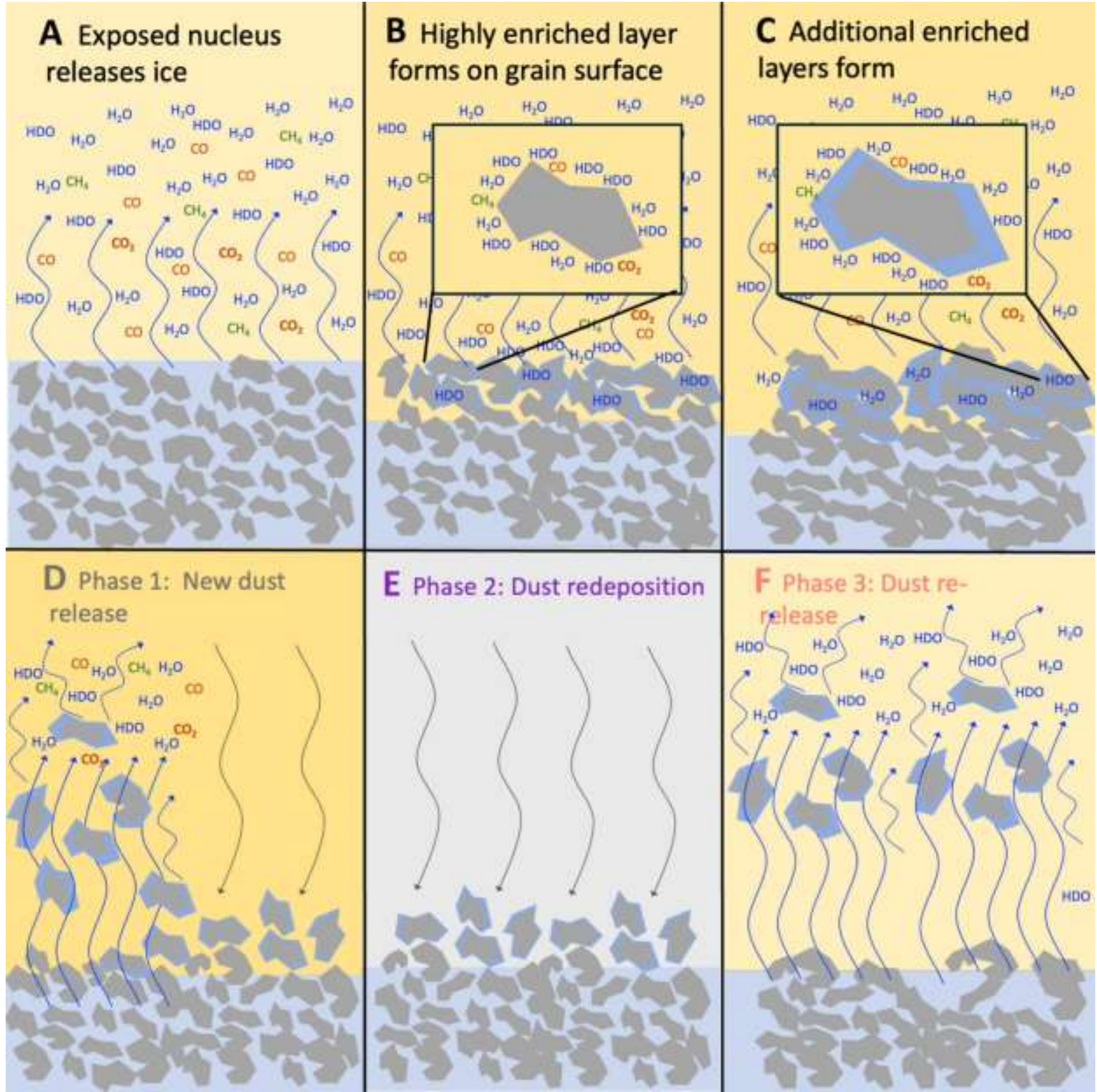
ظروف السديم الشمسي الأولي باستخدام نسبة الديوتيريوم/الهيدروجين في الماء كمؤشر لظروف تكوّن لبنات بناء الكواكب ومصادر الماء في النظام الشمسي الداخلي.

يوضح الشكل قياسات نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) المتاحة حاليًا في جميع أنحاء النظام الشمسي مقارنةً بقيمة متوسط مياه المحيطات القياسية الأرضية في فيينا (VSMOW). تشمل القيود المهمة للسديم الشمسي الأولي (PSN) نسبة D/H في الشكل الأولي للهيدروجين ($H_2$) وفي جليد الماء. يتحول الديوتيريوم في الشمس إلى الهيليوم ($^3He$) بمرور الوقت، مما يؤدي إلى انخفاض نسبة D/H في الشمس اليوم مقارنةً بالسديم الشمسي الأولي. استُخدمت نسبة D/H في غلاف المشتري الجوي لتحديد قيمة $H_2$ البدائي. أما الماء البدائي، الذي تباين تركيبه النظائري داخل السديم الشمسي الأولي، فيُمكن تحديده بدقة أكبر من خلال القياسات التي أُجريت على بقايا لبنات بناء الكواكب.




تُقارن جميع القياسات بقيم VSMOW الأرضية (الخطوط المتقطعة). تم الإبلاغ عن عدة أنواع من المذنب المستهدف بواسطة مركبة روزيتا، وهو المذنب 67P/Churyumov-Gerasimenko (67P/C-G؛ معينات سوداء مفتوحة مع أشرطة خطأ زرقاء)، وتُقارن هذه القياسات بنتائج هذه الدراسة (مربعات سوداء مفتوحة مع أشرطة خطأ زرقاء). (أ) تتوفر عدة قياسات لنسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H)، بما في ذلك قياسات النيازك الكوندريتية (الرمادي)، وأقمار زحل (السماوي والبرتقالي)، واثنين من الأجرام العابرة لنبتون (الأزرق الفولاذي)، والعديد من مذنبات سحابة أورت (الأزرق الممتلئ) ومذنبات عائلة المشتري (الأزرق ذو الإطار الأسود). (ب) تتوفر قياسات نسبة الأكسجين $^{16}O/^{17}O$ للشمس والمريخ والنيازك الكوندريتية (الرمادي)؛ وتيتان (البرتقالي)؛ والمذنب P/C-G67. (ج) يتوفر أيضًا $^{16}O/^{18}O$ لكوكب المشتري، وكوكب الزهرة، والعديد من مذنبات سحابة أورت (OCCs؛ باللون الأزرق المعبأ)، ومذنب إضافي واحد من عائلة المشتري (أزرق مع مخطط أسود) (انظر المواد التكميلية والجداول من S1 إلى S3).

تتوفر العديد من القياسات لتقييم تغير نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) في الماء. لا تمثل نسبة D/H في أغلفة الكواكب الأرضية نظائر الماء في مواقع تشكل هذه الكواكب، بل تمثل مزيجًا من الماء الذي وصل إلى كل كوكب أثناء تشكله مباشرةً من السديم النجمي الأولي، وبعد تشكله نتيجة اصطدامات الكويكبات والمذنبات، متبوعًا بزيادة في الديوتيريوم نتيجةً لتسربه. مع ذلك، لا يزال المزيج الدقيق للماء البدائي والكويكبات والمذنبات غير مفهوم تمامًا. استُخدمت قيم D/H الأرضية في الكوندريتات ومعظم مذنبات عائلة المشتري (JFCs) للقول بأن الكويكبات أو مذنبات عائلة المشتري هي مصدر ماء الأرض. إلا أن مذنبات عائلة المشتري كمصدر أُثيرت حولها الشكوك عندما قاس مسبار روزيتا أحد أعلى نسب D/H، والتي تزيد عن ثلاثة أضعاف النسبة الأرضية، في مذنب المشتري [P/C-G67].




نموذج مبسط لإثراء الديوتيريوم/الهيدروجين على حبيبات الغبار في سياق دورة الغبار المرصودة على المذنب P/C-G67. يبدأ تكوين طبقات غنية بالماء على حبيبات الغبار بما يلي: (أ) تبخر جليد الماء من النواة ليكشف أسطح الغبار. (ب) يمتص الماء الثقيل (HDO) والمواد فائقة التطاير، وربما الماء المشبع (H217O)، بشكل تفضيلي على الأسطح المكشوفة، مما يُكوّن طبقة سطحية غنية للغاية. (ج) تتراكم طبقات إضافية من جليد الماء المُخصّب قليلاً. (د) تبدأ دورة الغبار للمذنب P67 (30) خلال الحضيض، أو المرحلة الأولى، عندما يؤدي ازدياد النشاط إلى إطلاق حبيبات غبار جديدة في الغلاف الغازي. تُطلق هذه الحبيبات مواد فائقة التطاير والطبقات العليا من الماء المُخصّب (31). (هـ) خلال المرحلتين 1 و 2، يتم إعادة ترسيب حوالي 20٪ من حبيبات الغبار بحجم ديسيمتر على السطح في المناطق الأكثر برودة من النواة ليتم (و) إعادة تنشيطها خلال المرحلة التالية قبل الحضيض، أو المرحلة 3. في هذا الوقت، ينضب الجليد الموجود على حبيبات الغبار من المواد فائقة التطاير ويتم إطلاق الطبقات الأكثر غنى بجليد الماء.

## أصـــول الماء

تنبأت النماذج المبكرة لتكوين الكواكب بأن الغاز السديمي القريب من شمسنا الفتية كان شديد الحرارة بحيث لا يسمح بتكوين الجليد[1]. ولذلك، لم يكن من السهل دمج بخار الماء في المواد التي شكلت الكواكب الصخرية الداخلية: عطارد، والزهرة، والأرض، والمريخ. فقط كواكب المجموعة الشمسية الخارجية، مثل المشتري، تحتوي على وفرة من الماء والمواد المتطايرة الأخرى، لأنها تشكلت خارج "خط التجمد"، وهو الحد الوهمي بين بخار الماء وجليد الماء في السديم الشمسي. وُلدت هذه الكواكب على مسافة كافية من الشمس لتتمكن من دمج الماء المتجمد بسهولة.

لا يقتصر وجود الماء على الأرض في محيطاتها وغلافها الجوي فحسب، بل تحتوي أيضًا على ما يعادل عدة محيطات من الماء محبوسة داخل صخور باطنها العميق. ولحل هذا اللغز، يمكن تحليل أنواع خاصة من النيازك التي تشكلت في بدايات النظام الشمسي. هذه الصخور الفضائية، التي تُسمى الكوندريتات condensates، لم تندمج ولم تخضع لتغيرات كيميائية لتكوين كوكب كبير. تمثل الكوندريتات مكثفات من غاز السديم الشمسي، وهي أفضل مثال على نوع المواد التي تجمعت لتشكل الكواكب في نهاية المطاف. يشير التركيب النظائري للأرض إلى أن اللبنات الأساسية للكواكب الصخرية هي مواد شبيهة بالكوندريتات الإينستاتيتية enstatite chondrite.

مع ذلك، كان يُعتقد أن الكوندريتات الإينستاتيتية جافة جدًا بحيث لا تُفسر وجود الماء على الأرض. وبدلًا من ذلك، اقتُرح أن نوعًا غنيًا بالماء من الكوندريتات يُسمى الكوندريت الكربوني هو الذي جلب معظم مياه الكوكب. مع ذلك، لا تُعدّ النيازك الكربونية مثاليةً، إذ تختلف تركيبتها النظائرية اختلافًا كبيرًا عن الأرض، كما أنها تشكّلت خارج خط التجمد. ولتفسير هذه التناقضات الظاهرية، اقتُرح أن مواد شبيهة بالنيازك الكربونية قد أُضيفت إلى الأرض من خارج خط التجمد عندما كان الكوكب قد تشكّل في معظمه. ولتُقذف هذه النيازك على الأرض في بداياتها، يُعتقد أن تشكّل كوكب المشتري أو تجواله في النظام الشمسي الداخلي قد أثّر على مدارات الكويكبات، دافعًا إياها من الجزء الخارجي لحزام الكويكبات.

[1] Anne H. Peslier, The origins of water New measurements of Earth's building blocks point to a simpler water source, Science Vol. 369, No. 6507, 2020

يقدّم بياني Piani وزملاؤه تفسيرًا أبسط. إذ يجادل المؤلفون بشكلٍ مقنع بأن الماء قد يكون مصدره النيازك الإينستاتيتية. وقد قاسوا تركيز الماء ونسب الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) في هذه النيازك. ويبدو أن النيازك الإينستاتيتية تحتوي على كمية كافية من الماء لتزويد الأرض بكتلة تُعادل كتلة عدة محيطات سطحية. بالإضافة إلى ذلك، تتطابق نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين وتركيب نظائر النيتروجين مع تلك الموجودة في باطن الأرض.

يبدو الآن أن الأرض ربما تكون قد اكتسبت مياهها خلال عملية التراكم. تشير نماذج بديلة إلى إمكانية احتفاظ الكواكب الداخلية بالماء ضمن مكوناتها الأساسية. وقد طُرحت عدة تفسيرات، منها امتصاص الماء على المكثفات السديمية، واحتفاظ الغاز السديمي حول أجنة الكواكب، أو هجرة خط التجمد نحو الداخل. إن تكوّن النيازك الكوندريتية الإينستاتيتية في النظام الشمسي الداخلي يُخفف من صعوبة نقل الماء إلى الأرض من مناطق أبعد عن الشمس.

لا تُقدم ملاحظات بياني وزملاؤه أي قيود على توقيت اندماج الماء في الأرض. قد يكون الاندماج المبكر خلال عملية التراكم غير ذي صلة إذا ما تحرر معظم الماء خلال المراحل المبكرة من تاريخ الكوكب. كما أن تكوّن محيطات الصهارة والقصف النيزكي المكثف سيؤديان إلى فقدان الماء في الفضاء. بدلاً من ذلك، ربما تكون مادة شبيهة بالكوندريت الإينستاتيتي قد اندمجت في الأرض بعد تراكمها. بعد تراكم الأرض، يبدو أن الماء قد أُضيف إلى محيطاتها وغلافها الجوي (وليس إلى باطنها)، بمساهمات من المذنبات ومواد كربونية شبيهة بالكوندريت. ومع ذلك، يُضيف عمل الباحثين عنصرًا حاسمًا وأنيقًا إلى هذا اللغز. قد يكون ماء الأرض قد أتى ببساطة من مادة السديم التي تراكمت منها الكوكب.

## مرصد ألما يتتبع تاريخ الماء في تكوين الكواكب وصولاً إلى الوسط بين النجوم

كشفت رصدات الماء في القرص المتشكل حول النجم الأولي V883 Ori عن أدلة حول تكوين المذنبات والكواكب الصغيرة في نظامنا الشمسي، يقع النجم الأولي V883 Orionis على بُعد 1305 سنة ضوئية تقريبًا من الأرض في كوكبة الجبار. وقد ساعدت الملاحظات الجديدة لهذا النجم الأولي العلماء على إيجاد صلة محتملة بين الماء في الوسط بين النجوم والماء في نظامنا الشمسي، وذلك بتأكيد تشابه تركيبهما.

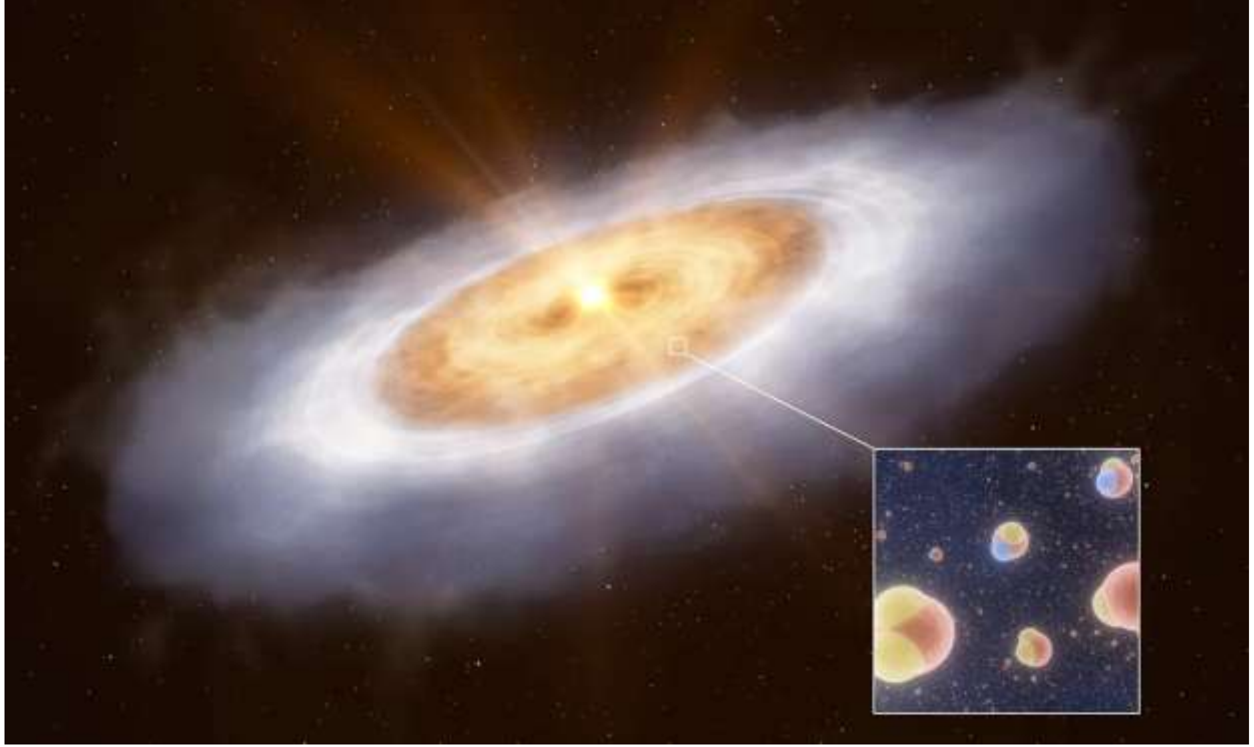
قال جون توبين، عالم الفلك في المرصد الوطني لعلم الفلك الراديوي التابع للمؤسسة الوطنية للعلوم (NRAO) والمؤلف الرئيسي للورقة البحثية الجديدة: "يمكننا أن نتخيل مسار الماء عبر الكون كأثر. نعرف شكل نهايتي هذا الأثر، وهما وجود الماء على الكواكب وفي المذنبات، لكننا أردنا تتبع هذا الأثر إلى أصول الماء". وأضاف: "قبل الآن، كنا قادرين على ربط الأرض بالمذنبات، والنجوم الأولية بالوسط بين النجوم، لكننا لم نتمكن من ربط النجوم الأولية بالمذنبات. لقد غيّر V883 Ori هذا الواقع، وأثبت أن جزيئات الماء في هذا النظام وفي نظامنا الشمسي لها نسبة مماثلة من الديوتيريوم والهيدروجين".

يُعدّ رصد الماء في الأقراص المحيطة بالنجوم الأولية أمرًا صعبًا، لأن الماء في معظم الأنظمة يكون موجودًا على شكل جليد. عندما يرصد العلماء النجوم الأولية، فإنهم يبحثون عن خط تجمد الماء أو خط الجليد، وهو المكان الذي يتحول فيه الماء من حالة جليدية في الغالب إلى حالة غازية، وهو ما يمكن لعلم الفلك الراديوي رصده بدقة. قال توبين: "إذا كان خط التجمد قريبًا جدًا من النجم، فلن يكون هناك ما يكفي من الماء الغازي لرصده بسهولة، وقد يحجب القرص الغباري جزءًا كبيرًا من انبعاثات الماء. أما إذا كان خط التجمد أبعد عن النجم، فسيكون هناك ما يكفي من الماء الغازي لرصده، وهذا هو الحال مع V883 Ori". وأضاف أن الحالة الفريدة للنجم الأولي هي ما جعلت هذا المشروع ممكنًا.

يتميز قرص V883 Ori بكتلته الهائلة وحرارته الكافية لتحويل الماء فيه من جليد إلى غاز. وهذا ما يجعل هذا النجم الأولي هدفًا مثاليًا لدراسة نمو وتطور الأنظمة الشمسية بأطوال موجات الراديو. وقال جو بيس، مسؤول برنامج ALMA في مؤسسة العلوم الوطنية الأمريكية: "تسلط هذه الملاحظة الضوء على القدرات الفائقة لجهاز ALMA في مساعدة علماء الفلك على دراسة عنصر بالغ الأهمية للحياة على الأرض: الماء". إن فهم العمليات الأساسية المهمة لنا على الأرض، والتي تُرى في مناطق أبعد من المجرة، يُثري معرفتنا بكيفية عمل

الطبيعة عمومًا، والعمليات التي كان لا بد من حدوثها ليتطور نظامنا الشمسي إلى ما نعرفه اليوم. ولربط الماء في القرص الكوكبي الأولي للمذنب V883 Ori بالماء في نظامنا الشمسي، قاس الفريق تركيبه باستخدام مستقبلات النطاق 5 (1.6 مم) والنطاق 6 (1.3 مم) عالية الحساسية التابعة لمرصد ألما، ووجدوا أنه يبقى دون تغيير يُذكر بين كل مرحلة من مراحل تكوين النظام الشمسي: النجم الأولي، والقرص الكوكبي الأولي، والمذنبات. وقالت ميريل فان هوف، عالمة الفلك بجامعة ميشيغان والمشاركة في تأليف البحث: "هذا يعني أن الماء في نظامنا الشمسي قد تشكل قبل وقت طويل من تشكل الشمس والكواكب والمذنبات. كنا نعلم مسبقًا بوجود كميات وفيرة من جليد الماء في الوسط بين النجوم. تُظهر نتائجنا أن هذا الماء قد اندمج مباشرةً في النظام الشمسي أثناء تكوينه". هذا أمرٌ مثيرٌ للاهتمام، إذ يُشير إلى أن أنظمةً كوكبيةً أخرى قد تلقت كمياتٍ كبيرةً من الماء أيضًا.

يُعدّ توضيح دور الماء في تكوين المذنبات والكويكبات أمرًا بالغ الأهمية لفهم كيفية نشأة نظامنا الشمسي. على الرغم من الاعتقاد السائد بأن الشمس قد تشكّلت في عنقودٍ نجميٍّ كثيف، وأنّ V883 Ori معزولٌ نسبيًا ولا توجد به نجومٌ قريبة، إلا أنهما يشتركان في أمرٍ جوهريٍّ واحد: كلاهما تشكّل في سحبٍ جزيئيةٍ عملاقة. «من المعروف أن معظم الماء في الوسط بين النجوم يتشكل على هيئة جليد على أسطح حبيبات الغبار الدقيقة في السحب. وعندما تنهار هذه السحب تحت تأثير جاذبيتها الذاتية وتُشكّل نجومًا فتية، ينتهي المطاف بالماء في الأقراص المحيطة بها. وفي نهاية المطاف، تتطور هذه الأقراص وتتكتل حبيبات الغبار الجليدية لتُشكّل نظامًا شمسيًا جديدًا بكواكب ومذنبات»، هذا ما قالته مارغوت ليمكر، عالمة الفلك بجامعة لايدن والمشاركة في تأليف البحث. «لقد أظهرنا أن الماء المُنتَج في السحب يتبع هذا المسار دون تغيير يُذكر. لذا، من خلال دراسة الماء في قرص V883 Ori، فإننا نعود بالزمن إلى الوراء لنرى كيف كان يبدو نظامنا الشمسي عندما كان أصغر سنًا بكثير».



رصد مرصد أتاكاما الكبير للموجات المليمترية (ALMA) خط تجمد الماء حول النجم الفتيّ V883 Orionis، المُحاط بأقراص كوكبية أولية من الغاز والغبار. تتسبب حرارة النجم في بقاء الماء في الحالة الغازية حتى مسافة 3 وحدات فلكية منه. يُظهر الرسم التوضيحي لخط تجمد الماء حول النجم الفتيّ V883 Orionis، كما رُصد بواسطة مرصد أتاكاما الكبير للموجات المليمترية (ALMA) عام 2016. غالبًا ما تُحاط النجوم الفتية بأقراص كثيفة دوّارة من الغاز والغبار، تُعرف بالأقراص الكوكبية الأولية، والتي تتشكل منها الكواكب. ونظرًا لحرارة النجم الفتيّ النموذجي الشبيه بالشمس، يبقى الماء داخل القرص الكوكبي الأولي في الحالة الغازية حتى مسافة 3 وحدات فلكية تقريبًا من النجم. (NRAO/AUI/NSF)/ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

## "الأنهار الجليدية بين النجوم": مشروع SPHEREx التابع لناسا يرسم خرائط لمناطق جليدية مجرية شاسعة

نجحت مهمة SPHEREx التابعة لناسا (مقياس الطيف الضوئي لتاريخ الكون، وعصر إعادة التأين، ومستكشف الجليد) في رسم خريطة للجليد بين النجوم على نطاق غير مسبوق. وقد غطت هذه المهمة مناطق في مجرتنا درب التبانة تمتد لأكثر من 600 سنة ضوئية، حيث وُجد الجليد داخل سحب جزيئية عملاقة - وهي مناطق شاسعة من الغاز والغبار تنهار فيها كتل كثيفة من المادة تحت تأثير الجاذبية، مما يؤدي إلى ولادة النجوم[1].

يتمثل أحد الأهداف الرئيسية لمشروع SPHEREx في رسم خريطة للبصمات الكيميائية لأنواع مختلفة من الجليد بين النجوم. يحتوي هذا الجليد على جزيئات مثل الماء وثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون، وهي جزيئات حيوية للتفاعلات الكيميائية التي تسمح بنشوء الحياة. يعتقد الباحثون أن خزانات الجليد هذه، الملتصقة بأسطح حبيبات الغبار الدقيقة، هي المكان الذي يتشكل فيه معظم الماء في الكون ويُخزن. فالماء الموجود في محيطات الأرض، والجليد الموجود في المذنبات وعلى الكواكب والأقمار الأخرى في مجرتنا، ينشأ من هذه المناطق.

يقول فيل كورنغوت Phil Korngut، عالم الأجهزة في مشروع SPHEREx في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (كالتك) في باسادينا Pasadena، كاليفورنيا، والمشارك في إعداد الدراسة: "تشبه هذه المجمعات الجليدية الشاسعة "الأنهار الجليدية بين النجوم" التي يمكن أن توفر إمدادات هائلة من الماء للأنظمة الشمسية الجديدة التي ستنشأ في هذه المنطقة. إنها فكرة بالغة الأهمية أننا ننظر إلى خريطة للمواد التي قد تتساقط على الكواكب الوليدة، والتي من المحتمل أن تدعم الحياة في المستقبل." بفضل قدراته الطيفية، يستطيع مرصد SPHEREx قياس كميات أنواع مختلفة من الجليد والجزيئات، مثل الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، داخل السحب الجزيئية وحولها، مما يساعد العلماء على فهم تركيبها وبيئتها بشكل أفضل.

على الرغم من أن التلسكوبات الفضائية، مثل تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا وتلسكوب سبيتزر المتقاعد، قد رصدت الماء وثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون وجزيئات جليدية أخرى في مجرتنا، فإن

---

[1] ( https://phys.org/news/2026-04-interstellar-glaciers-nasa-spherex-vast.html#google_vignette

مرصد SPHEREx هو أول مهمة تعمل بالأشعة تحت الحمراء مصممة خصيصًا لرصد هذه الجزيئات في جميع أنحاء السماء من خلال مسحه الطيفي واسع النطاق.

يقول المؤلف الرئيسي للدراسة، جوزيف هورا، عالم الفلك في مركز الفيزياء الفلكية (CfA) بجامعة هارفارد ومؤسسة سميثسونيان Smithsonian في كامبريدج، ماساتشوستس Massachusetts: "توقعنا رصد هذه الأنواع من الجليد أمام النجوم الساطعة: إذ يعمل ضوء النجم ككشاف ضوئي، كاشفًا أي جليد في الفضاء بيننا وبين ذلك النجم. لكن هذا شيء مختلف".

عند النظر على طول مستوى المجرة - حيث تتركز معظم النجوم والغاز والغبار في مجرتنا - نجد ضوءًا خلفيًا منتشرًا يخترق سحب الغبار بأكملها، ويستطيع مرصد SPHEREx رصد التوزيع المكاني للجليد الموجود فيها بتفاصيل دقيقة للغاية. يُدار مرصد SPHEREx من قِبل مختبر الدفع النفاث التابع لناسا في جنوب كاليفورنيا، وقد أُطلق في 11 مارس 2025، ويتمتع بقدرة فريدة على رصد السماء بـ 102 لون، يُمثل كل منها طولًا موجيًا مختلفًا من الأشعة تحت الحمراء، مما يوفر معلومات مميزة عن المجرات والنجوم ومناطق تكوّن الكواكب وغيرها من الظواهر الكونية. وبحلول أواخر عام 2025، أنجز SPHEREx أولى خرائطه الأربع للأشعة تحت الحمراء التي تغطي كامل السماء، ورسم مواقع مئات الملايين من المجرات ثلاثية الأبعاد للمساعدة في الإجابة عن أسئلة جوهرية حول الكون، بما في ذلك تلك المتعلقة بأصول الماء والحياة. أطلق مرصد SPHEREx أول خريطة من أصل أربع خرائط شاملة للسماء بالأشعة تحت الحمراء، مُحددًا مواقع مئات الملايين من المجرات ثلاثية الأبعاد للمساعدة في الإجابة عن أسئلة رئيسية حول الكون، بما في ذلك تلك المتعلقة بأصول الماء والحياة. باستخدام خرائط SPHEREx لجزيئات جليدية متنوعة، تمكن مؤلفو الدراسة من دراسة أعماق العديد من السحب الجزيئية في منطقتي سيغنوس إكس Cygnus X وسديم أمريكا الشمالية في مجرة درب التبانة. في المناطق الأكثر كثافة، حيث تبلغ كمية الغبار ذروتها، تحجب خيوط داكنة الضوء المرئي المنبعث من النجوم خلفها. كما كشف التلسكوب الفضائي، بفضل عدسته التي تعمل بالأشعة تحت الحمراء، عن أماكن تركز أنواع الجليد المختلفة - التي تمتص أطوال موجية محددة من الأشعة تحت الحمراء التي كانت ستخترق السحب لو كانت تتكون من الغبار فقط - بأقصى كثافة لها.

تدعم هذه النتيجة فرضية أن الجليد بين النجوم يتشكل على سطح جزيئات غبار دقيقة، لا يزيد حجمها عن حجم جزيئات دخان الشموع، وأن المناطق الكثيفة من الغبار تحمي الجليد من الأشعة فوق البنفسجية

الشديدة المنبعثة من النجوم الوليدة. مع ذلك، لا تُعامل جميع أنواع الجليد بالطريقة نفسها في الوسط بين النجوم.

قال غاري ميلنيك Gary Melnick، عالم الفلك في مركز هارفارد-سميثسونيان للفيزياء الفلكية (CfA) والمشارك في إعداد الدراسة: "يمكننا دراسة العوامل البيئية التي تُسهم في اختلاف معدلات تكوّن الجليد عبر مساحات شاسعة من الفضاء بين النجوم. تُتيح لنا مهمة SPHEREx رؤية شاملة تُوفر معلومات جديدة قيّمة لا يُمكن الحصول عليها عند التركيز على منطقة صغيرة." ويضيف ميلنيك أنه ضمن هذا المنظور الواسع، تستطيع SPHEREx القيام بما لا تستطيع المراصد الأرضية القيام به: رصد كميات متفاوتة من الماء وثاني أكسيد الكربون، وهما نوعان من الجليد يستجيبان بشكل مختلف للعوامل البيئية. فعلى سبيل المثال، يؤثر وجود ضوء فوق بنفسجي مكثف من نجوم فتية ضخمة قريبة، أو تسخين حبيبات الغبار بواسطة هذا الضوء، على وفرة أنواع الجليد المختلفة بطرق متباينة.

هذه مجرد بداية للمهمة. ستُوفر عمليات الرصد من SPHEREx للعلماء أداة قوية لاستكشاف مختلف مكونات مجرتنا، وفيزياء الوسط بين النجوم التي تُؤدي إلى تكوّن النجوم والكواكب، والعمليات الكيميائية التي تُوصل الجزيئات الأساسية للحياة إلى الكواكب حديثة التكوين.

## مشروع SPHEREx لرسم الخرائط الطيفية بالأشعة تحت الحمراء واسعة المجال للجليد بين النجوم والهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات

نقدم بعضًا من أولى الخرائط الطيفية بالأشعة تحت الحمراء[1] التي التقطها مرصد SPHEREx. تكشف هذه الخرائط، التي تُعدّ -حسب علمنا- الأكبر من نوعها على الإطلاق في نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة، عن خطوط طيفية قوية متعددة ناتجة عن الجليد بين النجوم والهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAHs) في جميع أنحاء منطقتي سيغنوس إكس وسديم أمريكا الشمالية. تُبرز الخرائط أقوى السمات الناتجة عن خطوط H2O عند 3 ميكرومتر، وCO2 عند 4.27 ميكرومتر، وCO عند 4.67 ميكرومتر، بالإضافة إلى سمة PAH عند 3.28 ميكرومتر، والتي تم رصدها جميعًا على مساحات واسعة بتوزيعات مكانية معقدة وخيطية. تُظهر خرائط امتصاص الجليد لـ H2O وCO2 على وجه الخصوص مناطق كثيفة وباردة ومحمية جيدًا عبر سيغنوس إكس، بما يتوافق مع الصورة الراسخة لتكوين الجليد بكفاءة في السحب الجزيئية الكثيفة. كما تم رصد سمات الجليد بين النجوم بكثرة في الامتصاص المنتشر على مساحات واسعة. تتفاوت شدة إشارات $H_2O$ وCO2 باختلاف خطوط الرؤية، مما يشير إلى اختلافات محتملة في الظروف الفيزيائية المحلية أو التغيرات الكيميائية. يرتبط انبعاث PAH عند 3.28 ميكرومتر بانبعاث الإشارات عند 7.7 و11.2 ميكرومتر، ولكنه يُظهر اختلافات طفيفة قد تُعزى إلى توزيع حجم الحبيبات وتغيرات مجال الأشعة فوق البنفسجية المحيطة. ستدعم صور SPHEREx الطيفية الشاملة للسماء - والتي لا يُعرض منها في هذا العمل سوى جزء صغير - العديد من الدراسات العلمية، بما في ذلك بنية المجرة، وفيزياء الوسط بين النجوم، وكيمياء النجوم.

يُعتقد أن الجليد بين النجوم يحتوي على كميات كبيرة من الجزيئات ما قبل الحيوية، بما في ذلك الماء ($H_2O$) وثاني أكسيد الكربون ($CO_2$) وأول أكسيد الكربون (CO)، بالإضافة إلى كميات أقل من الميثانول ($CH_3OH$) والميثان ($CH_4$) والأمونيا ($NH_3$) والسيانيد ($OCN^-$) وكبريتيد الكربونيل. يُعتبر هذا الجليد، الذي يُغطي حبيبات الغبار المشاركة في تكوين النجوم الجديدة وأقراصها الكوكبية الأولية المحيطة بها، الخزانات الرئيسية لهذه

[1] Joseph L. Hora, Jinyoung K. Noh, Gary J. Melnick, Brandon S. Hensley, Roberta Paladini, Jeong-Eun Lee, Matthew L. N. Ashby, Volker Tolls, Jaeyeong Kim, Michael W. Werner, SPHEREx Widefield Infrared Spectral Mapping of Interstellar Ices and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, The Astrophysical Journal, Volume 1001, Number 2, 2026

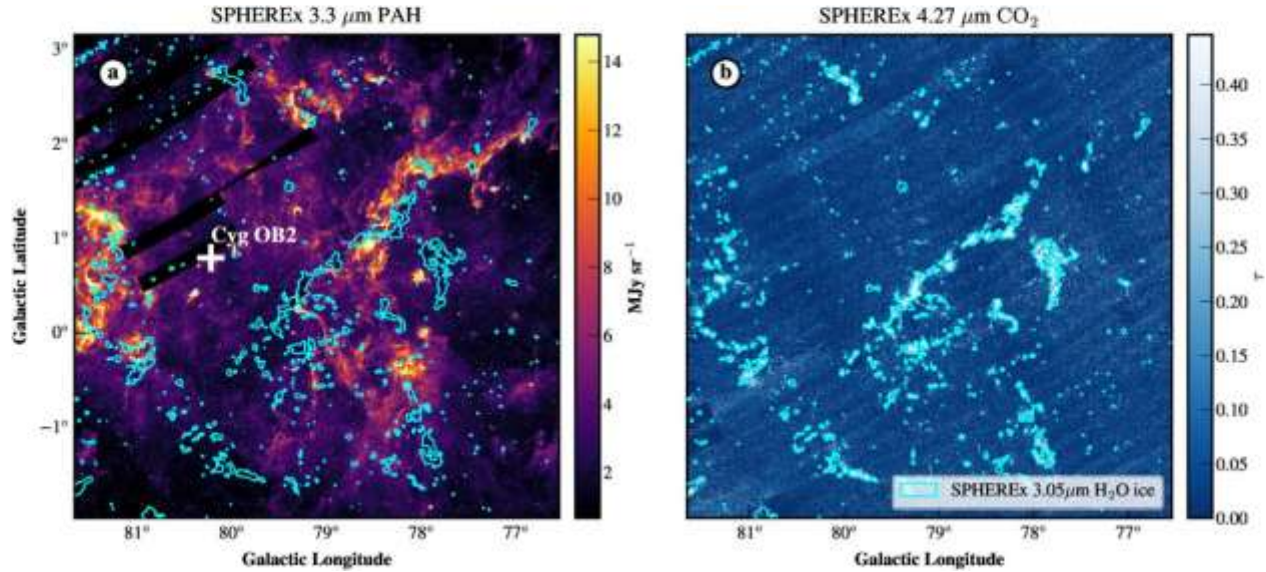
المواد المتطايرة الأساسية. يُعد تركيب الجليد بين النجوم، وبالتالي المخزون الذي يصل إلى الأنظمة الكوكبية الناشئة، عاملاً مهماً في فهم كيفية حصول الكواكب، مثل كوكبنا، على الماء والجزيئات العضوية.

تُظهر أنواع هذا الجليد خصائص امتصاص واسعة مميزة تُشير إلى كثافتها العمودية وتركيبها. نظرًا لأن معظم هذه الخصائص الطيفية الرئيسية تقع عند أطوال موجية أكبر من 2.5 ميكرومتر، فإن امتصاصها في الغلاف الجوي للأرض، بالإضافة إلى الخلفيات الحرارية العالية من السماء والتلسكوبات، يجعل رصدها من الأرض أمرًا صعبًا. ولذلك، فإن العديد من أدق القياسات الحالية للجليد في السحب الجزيئية قد أتت من مهمات فضائية تعمل بالأشعة تحت الحمراء، وأبرزها مرصد الفضاء بالأشعة تحت الحمراء وتلسكوب سبيتزر الفضائي. ويُعدّ تركيب الجليد بين النجوم محورًا رئيسيًا للعديد من دراسات تلسكوب جيمس ويب الفضائي، والتي كشفت بالفعل عن اختلافات كبيرة في تركيب الجليد عبر مواقع مختلفة في مجرتنا.

تُظهر الخرائط التي عرضناها لمنطقة CygX، والتي تبلغ دقتها 5°×5°، قدرة SPHEREx على إنتاج خرائط واسعة النطاق للخصائص الطيفية في نطاق الأطوال الموجية من 0.75 إلى 5 ميكرومتر. تُبين خرائط امتصاص جليد الماء ($H_2O$) وثاني أكسيد الكربون ($CO_2$) توزيع هذه الأنواع في هياكل خيطية تمتد لعدة درجات عبر المجال. تتشابه توزيعات هذه الأنواع من الجليد، على الرغم من أن أطياف مصادر الخلفية خلف السحب المظلمة تُظهر أن القوة النسبية (وبالتالي كثافة الأعمدة) لخصائص الامتصاص تختلف على نطاقات مكانية صغيرة. ويُلاحظ هذا التأثير أيضًا في العديد من خطوط الرؤية التي تم رصدها في سحابة LDN 935 المظلمة.

وتكشف مقارنة خرائط جليد الماء وثاني أكسيد الكربون مع بيانات NICEST لانقراض النطاق J، وانبعاث $^{13}CO$، وكثافة عمود الغبار المستمدة من بيانات هيرشل، عن صورة فيزيائية متسقة عبر CygX. يكون امتصاص الجليد في أقصى درجاته على طول خطوط الرؤية الباردة والكثيفة والمحمية جيدًا، ويتبع عمومًا مناطق الكثافة العمودية العالية وانبعاثات $^{13}CO$ المرتفعة، متجنبًا البيئات الأكثر دفئًا. ومن المرجح أن تنشأ الاختلافات المتبقية من تجمد ثاني أكسيد الكربون في الحالة الغازية في المناطق الباردة والكثيفة، ومن التأثيرات الهندسية لخط الرؤية التي تحد من مساهمة مكونات السحب الأكثر انتشارًا أو الخلفية في خرائط امتصاص الجليد، على الرغم من أن هذه المكونات لا تزال تُرصد بواسطة أدوات تشخيص الغبار والغاز الأخرى. وبشكل عام، تتوافق هذه النتائج تمامًا مع الصورة الراسخة لتكوّن الجليد في السحب الجزيئية الكثيفة، وتُظهر أن

هذه الصورة تظل صالحة على النطاقات المكانية الواسعة التي رصدها جهاز CygX، والتي تشمل العديد من السحب الجزيئية العملاقة.




مقارنة انبعاثات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات وامتصاص أنواع الجليد باتجاه منطقة CygX. تم إنشاء خرائط SPHEREx بمقياس بكسل 6 تشير الخطوط الزرقاء في جميع الصور إلى أعماق بصرية قصوى لجليد الماء تبلغ 0.25، مستمدة من خريطة جليد الماء المُنعّمة باستخدام نواة غاوسية ″31 ~ σ (5 بكسلات). (أ) انبعاثات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات من SPHEREx عند 3.28 ميكرومتر. يشير الصليب الأبيض إلى موقع Cyg OB2. (ب) العمق البصري الأقصى لجليد ثاني أكسيد الكربون من SPHEREx عند 4.27 ميكرومتر.

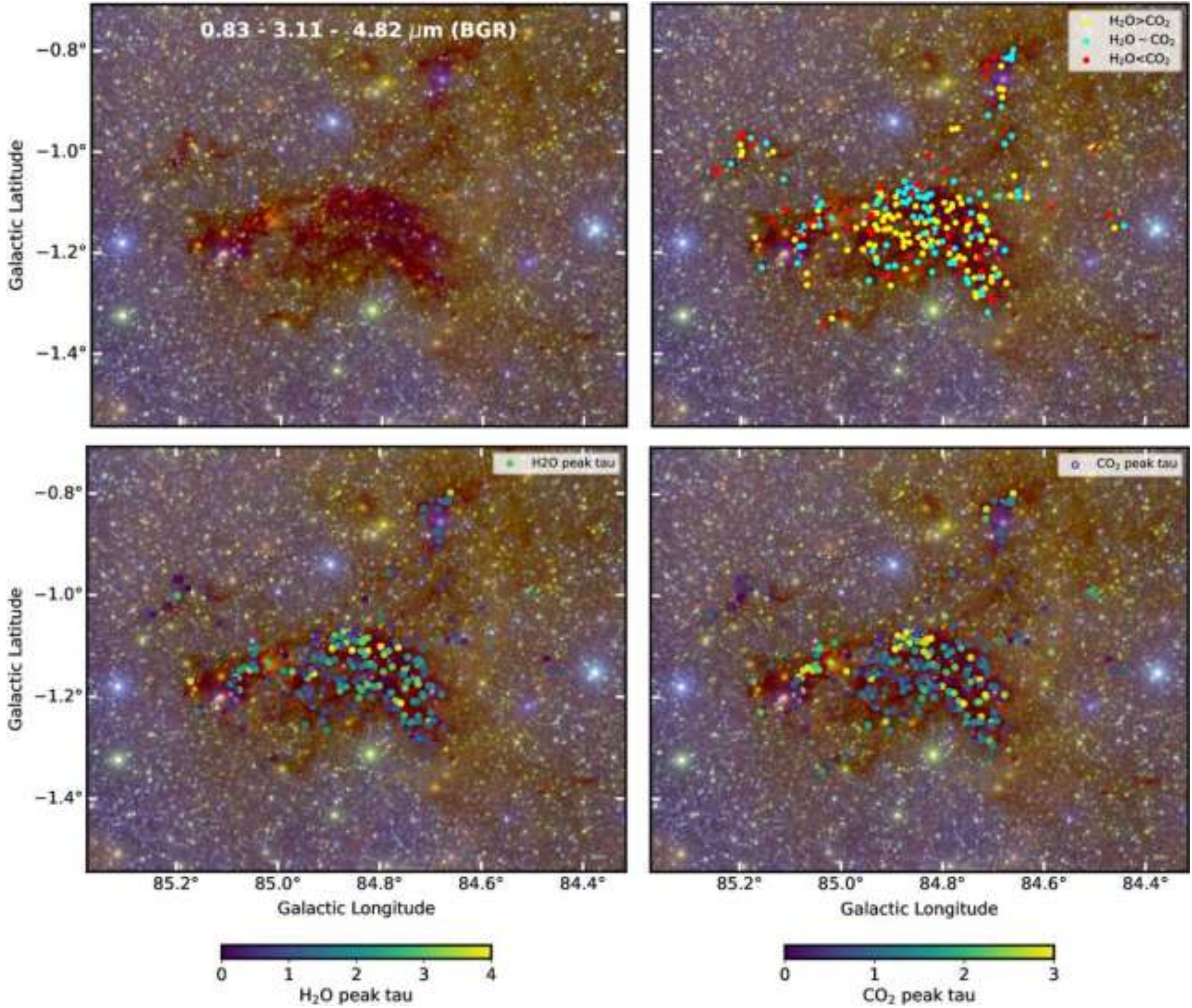
ترتبط صورة SPHEREx للهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات عند 3.28 ميكرومتر ارتباطًا وثيقًا بصور IRAC وWISE التي تُغطي خصائص 7.7 و11.3 ميكرومتر، ولكن تُلاحظ اختلافات قد تكون مرتبطة بتأثيرات حجم الحبيبات و/أو مجال الأشعة فوق البنفسجية. تُمكّن الدقة الطيفية العالية لجهاز SPHEREx، مقارنةً بنطاقات التردد الواسعة المستخدمة في جهازي Spitzer/IRAC وWISE، من فصل طيف الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAH) عن الطيف المتصل وانبعاثات الخطوط الأخرى في نطاق الطول الموجي 3-4 ميكرومتر، مما يسمح بإجراء قياسات دقيقة لطيف الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، بالإضافة إلى دراسة الحبيبات الأليفاتية في هذه المناطق. تُظهر مقارنة انبعاثات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات بتوزيع الجليد وجود علاقة عكسية، يُمكن تفسيرها بأن انبعاثات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات

تكون أقوى في المناطق ذات درجات حرارة الغبار الأعلى، بينما يكون امتصاص الجليد أعلى في المناطق الكثيفة المحمية من الأشعة فوق البنفسجية.

لقد بيّنا أنه بالإضافة إلى خصائص امتصاص الجليد وانبعاثات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، يرصد جهاز SPHEREx خطوط إعادة تركيب الهيدروجين وجزيء الهيدروجين ($H_2$) من العديد من المناطق التي يغطيها نطاقه الطيفي 0.75-5 ميكرومتر. وقد عرضنا العديد من الصور والأطياف التي تُبيّن كيفية استخدام جهاز SPHEREx لدراسة الانبعاثات من هذه الأنواع في المصادر النقطية وفي مناطق الانبعاث الممتدة للوسط بين النجوم.

مع تقديم هذه الورقة، أنجز مرصد SPHEREx خريطة كاملة للسماء. وخلال الفترة المتبقية من مهمته التي تمتد لسنتين، سيواصل المرصد رصد السماء ورسم خرائطها ثلاث مرات أخرى. وقد أنتج الفريق العلمي لمرصد SPHEREx صورًا شاملة للسماء من المسوحات الأولى، ومن المقرر إصدار مكعبات بيانات شاملة للسماء في 102 قناة طيفية بعد ستة أشهر من السنة الأولى للمهمة.

إضافةً إلى محاور المهمة الرئيسية، ستدعم خرائط SPHEREx وأطيافها في نطاق 0.75-5.0 ميكرومتر العديد من الدراسات العلمية الإضافية في مجرة درب التبانة والمجرات المجاورة. توجد العديد من الخطوط ذات الأهمية الفيزيائية الفلكية في نطاق الطول الموجي هذا، بما في ذلك الانبعاث من خطوط إعادة تركيب الهيدروجين في سلسلة Paschen و Brackett و Pfund، والهيدروجين الجزيئي ($H_2$)، والهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، والنطاق الاهتزازي الدوراني الأساسي لـ CO v = 1–0 حول 4.7 ميكرومتر والنطاق التوافقي 2–0 حول 2.3 ميكرومتر، والانبعاث الحراري من الغبار الدافئ.




صورة فسيفسائية من SPHEREx للسحابة المظلمة LDN 935. تُظهر جميع اللوحات نفس الصورة ثلاثية الألوان كما في اللوحة العلوية اليسرى، باستخدام نطاقات أطوال موجية مركزية عند 0.83 و3.11 و4.82 ميكرومتر للأزرق والأخضر والأحمر على التوالي. تُظهر اللوحات الثلاث الأخرى مواقع أطياف المصادر النقطية المستخرجة، بدوائر مُرمّزة بالألوان. في اللوحة السفلية اليسرى، تُرمّز النقاط وفقًا لذروة τ لميزة امتصاص جليد الماء ($H_2O$) عند 3.05 ميكرومتر، مع المقياس الموضح أسفل الرسم البياني. في اللوحة السفلية اليمنى، تُرمّز النقاط وفقًا لذروة τ لميزة جليد ثاني أكسيد الكربون ($CO_2$) عند 4.27 ميكرومتر. في الشكل العلوي الأيمن، يتم ترميز النقاط وفقًا لما إذا كانت ذروة τ لميزة H2O أكبر بنسبة 20٪ أو أكثر من ذروة τ لـ $CO_2$ (أصفر)، أو أن الميزتين تقعان ضمن 20٪ من بعضهما البعض (سماوي)، أو أن ميزة co2 أكبر بنسبة تزيد عن 20٪ من ميزة H2O (أحمر).

## اكتشاف جليد HDO باتجاه نجم أولي معزول منخفض الكتلة بواسطة تلسكوب جيمس ويب الفضائي

تم رصد الماء في بيئات تمثل جميع مراحل تكوين النجوم والنظام الشمسي[1]، إلا أن تطوره الكيميائي خلال هذه المراحل لا يزال غير مفهوم بشكل كامل. توفر نسب الديوتيريوم وسيلة لاستكشاف الروابط الكيميائية بين الماء في مناطق كونية مختلفة نظرًا لحساسيتها للظروف الفيزيائية والكيميائية. نقدم هنا أول رصد لخاصية جليد HDO عند 4.1 ميكرومتر باستخدام تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST) باتجاه نجم أولي منخفض الكتلة، L1527 IRS، والذي قد ينمو في النهاية إلى كتلة شبيهة بالشمس. قمنا بقياس نسبة جليد $HDO/H_2O$ التي تبلغ $4.4^{+3.7}_{-1.7} \times 10^{-3}$ حيث يهيمن على الخطأ المذكور عدم اليقين في تعريف الطيف المتصل وقوة نطاقات الجليد. هذه النسبة مشابهة لنسب غاز $HDO/H_2O$ المقاسة في النوى الداخلية الدافئة (>100 كلفن) لأغلفة النجوم الأولية الأخرى منخفضة الكتلة والأقراص الكوكبية الأولية الموجودة في مناطق تكوين النجوم المعزولة بشكل مماثل. يدعم هذا التشابه مبدئيًا الافتراض القائل بأن بخار الماء المكتشف في هذه المناطق لا يتأثر بشكل كبير بتفاعلات الطور الغازي التي تعقب تبخر الجليد. كما يدعم فرضية أن جليد الماء في المراحل ما قبل النجمية والأولية يُورث إلى حد كبير في حالة غير متغيرة كيميائيًا للأقراص الكوكبية الأولية الخارجية. مع ذلك، فإن هذه النسبة أعلى بنحو 4 إلى 10 مرات من نسب $HDO/H_2O$ الغازية المقاسة باتجاه المذنبات والنجوم الأولية منخفضة الكتلة في مناطق تشكل النجوم المتجمعة. قد يعود هذا الاختلاف إما إلى إعادة معالجة الماء في الطور الغازي في الأغلفة النجمية الأولية والأقراص الكوكبية الأولية، أو إلى اختلافات بين الظروف ما قبل النجمية للنوى الكثيفة المعزولة ومناطق تشكل النجوم المتجمعة، والتي تُشابه إلى حد كبير البيئة التي تشكلت فيها شمسنا.

أُعلن عن أول رصد وتحديد كمي لجليد HDO بواسطة تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST) باتجاه نجم أولي منخفض الكتلة، 1527L. تم الرصد والتحديد الكمي باستخدام نمط تمدد الرابطة O–D عند 4.1 ميكرومتر، والذي رُصد بواسطة جهاز NIRSpec IFU. بفضل حساسية تلسكوب جيمس ويب الفضائي ودقته الطيفية غير المسبوقة، تجاوز الرصد مستوى الضوضاء بما يقارب σ40، وكانت السمة الطيفية واضحة بما يكفي للكشف عن شكل غير متماثل مميز لكل من جليد HDO غير المتبلور والمتبلور في غلاف 1527L. بعد ذلك،

[1] Katerina Slavicinska, Łukasz Tychoniec, María Gabriela Navarro, Ewine F. van Dishoeck, John J. Tobin, Martijn L. van Gelder, Yuan Chen, A. C. Adwin Boogert, W. Blake Drechsler, Henrik Beuther, HDO Ice Detected toward an Isolated Low-mass Protostar with JWST, The Astrophysical Journal Letters, Volume 986, Number 2, 2025

قمنا بتحديد نسبة جليد $HDO/H_2O$ باتجاه هذا المصدر باستخدام نمط تذبذب جليد $H_2O$ عند 12 ميكرومتر في نطاق MIRI. يمكن تلخيص استنتاجاتنا الرئيسية على النحو التالي:

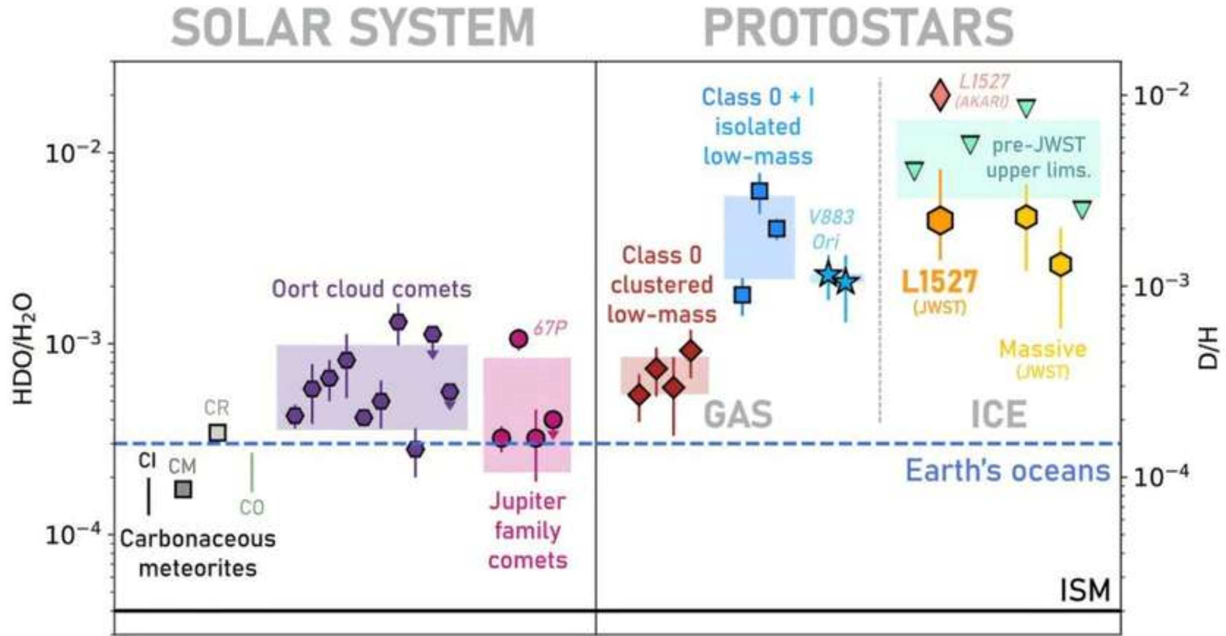
1. قمنا بقياس نسبة $HDO/H_2O$ في الجليد باتجاه 1527L، وكانت $4.4x10^{-3}$، حيث تُعزى الشكوك المُبلغ عنها بشكل رئيسي إلى عدم اليقين في تعريف الطيف المتصل وقوة نطاقات الجليد المختبرية، وليس إلى الشكوك الرصدية.

2. تتشابه نسبة $HDO/H_2O$ في الجليد 1527L مع نسب $HDO/H_2O$ في الغاز التي تم قياسها باستخدام التداخل الضوئي باتجاه المناطق الداخلية الساخنة لنجوم أولية أخرى معزولة منخفضة الكتلة، وضمن خط التجمد للقرص الكوكبي الأولي الفتي V883 Ori. يتوافق هذا التشابه عمومًا مع الافتراض القائل بأن وفرة الجزيئات في الطور الغازي في النجوم الأولية الساخنة والأقراص الفتية تُمثل تلك الموجودة في جليد النجوم الأولية، مع حد أدنى من التغيير الناتج عن المعالجة الكيميائية بواسطة تفاعلات الطور الغازي التي تعقب تبخر الجليد.

3. نسبة $HDO/H_2O$ في الجليد 1527L أكبر بأربع إلى سبع مرات من نسب $HDO/H_2O$ في الغازات المقاسة باتجاه النجوم الأولية منخفضة الكتلة من الفئة 0، وأكبر بعشر مرات من تلك المقاسة في المذنبات. قد يُعزى هذا الاختلاف إلى إعادة معالجة الماء في هذه الأجرام في الحالة الغازية في مرحلة ما، أو إلى اختلاف بيئات تكوّن النجوم المحلية التي تنعكس في نسبة $HDO/H_2O$ للجليد المتكون خلال المراحل ما قبل النجمية. إذا كان الاحتمال الأخير هو الصحيح، فمن المتوقع أن تتجاوز نسبة $HDO/H_2O$ في الجليد المقاسة باتجاه جرم معزول مثل 1527L النسب المقاسة في المذنبات في نظامنا الشمسي، لأن شمسنا على الأرجح تشكلت في بيئة أكثر تكتلاً.

في المستقبل، ستكون مقارنة نسب $HDO/H_2O$ في الغاز والجليد، المقاسة باتجاه المصدر نفسه، ضرورية لتحديد مدى التغيرات الكيميائية للماء في الطور الغازي داخل أغلفة النجوم الأولية وأقراص الكواكب الأولية، نظرًا للتشتت الكبير في قيم $HDO/H_2O$ الغازية المقاسة في النجوم الأولية منخفضة الكتلة. إضافةً إلى ذلك، هناك حاجة إلى قياسات جليد HDO باتجاه عينة أكبر من النجوم الأولية منخفضة الكتلة في كل من مناطق تكوين النجوم المتجمعة والمعزولة، وذلك لتوصيف تأثيرات الظروف البيئية المحلية على نسب $HDO/H_2O$ الجليدية في أغلفة النجوم الأولية بشكل كامل، ولتقييم العلاقة المحتملة بين جليد الماء في النجوم الأولية

والمذنبات بشكل قاطع. إن الحساسية والدقة الطيفية غير المسبوقة لتلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST) تفتح المجال لمثل هذه القياسات في المستقبل.




مقارنة نسب $HDO/H_2O$ المقاسة في أجرام النظام الشمسي البدائية المختلفة، وفي النجوم الأولية، سواء في الحالة الجليدية أو الغازية. يُشار إلى نسبة $HDO/H_2O$ الجليدية للنجم L1527، المقاسة في هذه الدراسة باستخدام بيانات تلسكوب جيمس ويب الفضائي، بالسداسي البرتقالي الكبير

## مياه الأرض أقدم من الشمس

بينما لا تزال النظريات حول أصول الماء محل نقاش، أظهرت دراسات النظام الشمسي المبكر أن الماء أقدم من الشمس نفسها[1]. ولكن ما هو عمر الماء، وكيف وصل إلى الأرض؟

الشمس، التي يبلغ عمرها 4.6 مليار سنة، أقدم من جميع الأجرام الأخرى في نظامنا الشمسي. ولكن اتضح أن الكثير من الماء الذي نسبح فيه ونشربه هنا على الأرض أقدم من ذلك. ما يصل إلى نصف الماء الموجود على الأرض اليوم ورثناه من مخزون وفير من الجليد بين النجوم أثناء تشكل شمسنا. هذا يعني أن رطوبة نظامنا الشمسي لم تكن نتيجة ظروف محلية في القرص الكوكبي الأولي، بل كانت سمة طبيعية لتكوين الكواكب، مما يثير الآمال في إمكانية وجود حياة في مكان آخر من الكون.

لطالما كان أصل ماء الأرض موضوعًا للبحث العلمي والنقاش. في البداية، اعتقد العلماء بنظرية الكويكب. ومع ذلك، تشير الدراسات الحديثة إلى أن ماء الأرض ربما يكون قد نشأ من السديم الشمسي.

1. نظرية الكويكبات: اعتقد العديد من العلماء أن الكويكبات، التي تحمل الماء في معادنها، هي التي جلبت الماء إلى الأرض. وقد دعمت هذه النظرية فكرة أن محتوى الماء الثقيل في الكويكبات يتوافق بشكل أكبر مع نسبة الماء الحالية على الأرض.
2. نظرية المذنبات: لفترة من الزمن، اعتُبرت المذنبات أيضًا مصدرًا محتملاً لمياه الأرض. ظهرت هذه النظرية عندما رصدت المركبة الفضائية الأوروبية "جيوتو" مذنب هالي ومحتواه العالي من الماء الثقيل. ومع ذلك، أظهرت دراسات لاحقة أن نسب الماء الثقيل في معظم المذنبات كانت أعلى بكثير من نسبتها على الأرض، مما أثار الشكوك حول دورها في جلب الماء إلى كوكبنا.
3. نظرية السديم الشمسي: ركزت عالمة الفلك كارين ميتش وزملاؤها على دراسة الماء في وشاح الأرض. درسوا عينات من أماكن مثل جزيرة بافن، حيث يسهل الوصول إلى أعماق وشاح الأرض. تضمنت هذه الدراسات تحليل نسب الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) في العينات لفهم أصل مياه الأرض.

[1] Carl Engelking, Nov 20, 2023, https://www.discovermagazine.com/earths-water-is-older-than-the-sun-561 (

أظهرت العينات انخفاضًا في نسبة الماء الثقيل بنحو 25% مقارنةً بالماء العادي، مما يشير إلى أن النيازك الكربونية (وهي نوع من النيازك) قد لا تكون المصدر الرئيسي لمياه الأرض. تشير هذه النتائج إلى أن مياه الأرض ربما تكون قد نشأت من السديم الشمسي، وهو سحابة من الغاز والغبار تشكلت منها الشمس والكواكب.

أثناء تشكل النظام الشمسي، مرّ هذا الماء بدورات تحول فيها إلى غاز ثم عاد إلى جليد، ليصبح في النهاية جزءًا من كواكب مثل الأرض، بالإضافة إلى الكويكبات والمذنبات. إن وجود نوع خاص من الماء، يُعرف بالماء الثقيل، على الأرض وفي هذه الأجرام الفضائية، يدل على أن جزءًا كبيرًا من الماء الذي نملكه نشأ من هذه العمليات الفضائية المبكرة.

نعم، الماء على الأرض أقدم من الشمس. في عام ٢٠١٤، حدد الباحثون عمر الماء في نظامنا الشمسي بالتركيز على نسبة الهيدروجين إلى الديوتيريوم، والذي يُسمى "الهيدروجين الثقيل" لاحتوائه على نيوترون إضافي. يتميز الجليد بين النجوم بنسبة عالية جدًا من الديوتيريوم إلى الهيدروجين لأنه تشكل في درجات حرارة منخفضة للغاية. كان العلماء على دراية بهذا الأمر مسبقًا من خلال دراسة تركيب المذنبات والكويكبات.

لكن، مما يزيد الأمر تعقيدًا، أن مستويات الديوتيريوم في مياه النظام الشمسي تتزايد باستمرار منذ نشأة الشمس. ولتحديد ما إذا كانت الشمس وحدها قادرة على إنتاج مستويات النظير الحالية، بنى الباحثون نموذجًا حاسوبيًا يعيد عقارب الساعة إلى بداية النظام الشمسي، مفترضين عدم وجود ديوتيريوم موروث.

ومع ذلك، لم يتمكن النموذج من إنتاج نسب ديوتيريوم إلى هيدروجين عالية كتلك الموجودة في نظامنا الشمسي. لذا، يُقدّر الباحثون أن ما بين 30 و50 بالمئة من مياه نظامنا الشمسي كانت جزءًا من السحابة الجزيئية القديمة التي نشأت منها الشمس والكواكب.

## هل مياهنا أقدم من الشمس؟ علماء الفلك يجدون دليلاً في الجليد المحيط بنجم شاب

تمكن فريق بحثي بقيادة جامعة لايدن Leiden في هولندا والمرصد الوطني لعلم الفلك الراديوي، ولأول مرة، من رصد جليد الماء شبه الثقيل حول نجم شاب شبيه بالشمس. في هذا الجليد، استُبدلت بعض ذرات الهيدروجين العادية بذرات الديوتيريوم، وهو نظير أثقل للهيدروجين[1].

إحدى الطرق التي يستخدمها علماء الفلك لتحديد أصل الماء هي قياس نسبة الديوتيريوم فيه. وهي نسبة الماء الذي يحتوي على ذرة ديوتيريوم واحدة بدلًا من ذرة هيدروجين. لذا، بدلًا من $H_2O$، يكون الناتج HDO، والذي يُسمى أيضًا الماء شبه الثقيل. تشير النسبة العالية من الماء شبه الثقيل إلى أن الماء قد تشكل في بيئة شديدة البرودة، مثل السحب المظلمة البدائية من الغبار والجليد والغاز التي تولد منها النجوم. في محيطاتنا والمذنبات والأقمار الجليدية، تصل نسبة الماء شبه الثقيل إلى جزيء واحد من بين آلاف جزيئات الماء. وهذا أعلى بعشر مرات تقريبًا مما هو متوقع بناءً على تركيب شمسنا. لذا، يفترض علماء الفلك أن بعض الماء في نظامنا الشمسي نشأ على هيئة جليد في السحب المظلمة، قبل مئات آلاف السنين من ولادة شمسنا. ولتأكيد هذه الفرضية، عليهم قياس نسبة الديوتيريوم في جليد الماء في مناطق تكوّن النجوم هذه.

وقد رصد فريق دولي من علماء الفلك نسبة عالية من جليد الماء شبه الثقيل في غلاف نجمي أولي، وهو سحابة المادة التي تحيط بالنجم في مراحله الجنينية. وتعزز هذه النتائج فرضية أن بعض الماء في نظامنا الشمسي قد تشكّل قبل شمسنا وكواكبنا. استخدم علماء الفلك تلسكوب جيمس ويب الفضائي. قبل إطلاقه، لم يكن بالإمكان قياس نسبة الديوتيريوم في الماء في مناطق تكوّن النجوم بدقة إلا في الحالة الغازية، حيث يمكن أن تتغير تركيبتها الكيميائية. تقول كاتي سلافيتشينسكا Katie Slavicinska، طالبة الدكتوراه من جامعة ليدن (هولندا) التي قادت الدراسة: "الآن، وبفضل حساسية ويب غير المسبوقة، نرصد إشارة واضحة للغاية لجليد الماء شبه الثقيل باتجاه نجم أولي".

النجم الأولي المعني هو L1527 IRS، ويقع في كوكبة الثور على بُعد حوالي 460 سنة ضوئية من الأرض. يقول جون توبين John Tobin، من المرصد الوطني لعلم الفلك الراديوي في فرجينيا (الولايات المتحدة الأمريكية)،

[1] ) https://www.universiteitleiden.nl/en/news/2025/06/is-our-water-older-than-the-sun-astronomers-find-clue-in-ice-around-young-star

والذي يرأس أحد برامج ويب المسؤولة عن عمليات الرصد: "يشبه هذا النجم، من نواحٍ عديدة، ما نعتقد أن شمسنا كانت عليه عندما بدأت تتشكل".

نسبة الديوتيريوم في الماء الموجود في 1527L تُشابه إلى حد كبير النسبة الموجودة في بعض المذنبات، وكذلك في القرص الكوكبي الأولي لنجم فتيّ أكثر تطورًا، مما يُشير إلى أصول كيميائية باردة وقديمة مماثلة للماء الموجود في جميع هذه الأجرام. تقول إيوين فان ديشويك Ewine van Dishoeck، الأستاذة في علم الفلك بجامعة لايدن، والتي كرّست جزءًا كبيرًا من حياتها المهنية لتتبع مسار الماء عبر الفضاء: "يُضيف هذا الاكتشاف إلى الأدلة المتزايدة على أن معظم جليد الماء يقطع رحلته دون تغيير يُذكر من المراحل الأولى إلى الأخيرة لتكوّن النجوم".

مع ذلك، فإن نسبة الديوتيريوم المقاسة في جليد الماء في L1527 IRS أعلى قليلًا من النسب المقاسة في بعض مذنبات نظامنا الشمسي، ومن نسبة الماء على الأرض. قد تُعزى هذه الاختلافات إلى عوامل عديدة، منها على سبيل المثال، احتمال تعرّض بعض الماء الموجود على تلك المذنبات وعلى الأرض لتغييرات كيميائية في القرص. أو ربما تختلف السحابة المظلمة التي تشكّلت منها شمسنا عن السحابة المظلمة التي تشكّلت فيها L1527 IRS.

تُخطط لإجراء المزيد من عمليات رصد جليد الماء شبه الثقيل للتحقق من الأسباب المحتملة لهذه الاختلافات. تقود سلافيتشينسكا، بالتعاون مع توم ميجيث Tom Megeath، أستاذ علم الفلك في جامعة توليدو (الولايات المتحدة الأمريكية)، العديد من برامج تلسكوب جيمس ويب الفضائي التي ستوسع نطاق البحث عن جليد الماء شبه الثقيل ليشمل 30 نجمًا أوليًا جديدًا وسحبًا مظلمة بدائية. في الوقت نفسه، يقود توبين عمليات رصد تكميلية باستخدام مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر، والتي ستبحث عن غاز الماء شبه الثقيل في العديد من الأهداف نفسها.

## والآن هل هناك أدلة تثبت أن المياه أقدم من كوكب الأرض نفسه ؟

لفهم كيفية نشأة الحياة، يدرس العلماء كيمياء الكربون والماء. ففي حالة الماء، يتتبعون الأشكال المختلفة، أو النظائر، لذرات الهيدروجين والأكسجين المكونة له عبر تاريخ الكون، كما لو كانوا يبحثون عن كنز ثمين. وقد تتبع باحثون من المركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي (CNRS)، وجامعة باريس ساكلاي، وهيئة الطاقة الذرية الفرنسية (CEA)، وجامعة باو ومنطقة باي دو لادور (UPPA)، بدعم من المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي (MNHN)، مسار التركيب النظائري للماء وصولاً إلى بداية النظام الشمسي، في المناطق الداخلية حيث تشكلت الأرض والكواكب الأرضية الأخرى. وقد فعلوا ذلك من خلال تحليل أحد أقدم النيازك في نظامنا الشمسي، باستخدام طريقة مبتكرة طُوّرت خصيصًا لدراستهم. وتُظهر بياناتهم وجود خزانين للغاز خلال أول 200 ألف سنة من عمر نظامنا الشمسي، حتى قبل تشكل الأجنة الكوكبية الأولى. كان أحد هذه الخزانات يتألف من الغاز الشمسي الذي نشأت منه جميع مواد نظامنا الشمسي. وبفضل النيزك، تمكن العلماء من قياس سجله مباشرةً لأول مرة على الإطلاق. أما خزان الغاز الثاني فكان غنيًا ببخار الماء، ويحمل بالفعل البصمة النظائرية للماء الأرضي. وقد تشكل نتيجة تدفق هائل للماء بين النجوم إلى المناطق الداخلية الساخنة للنظام الشمسي، عند انهيار الغلاف بين النجوم وتكوّن القرص الكوكبي الأولي. ويشير وجود هذا الغاز مبكرًا، بتركيب نظائري مشابه للأرض، إلى أن ماء الأرض كان موجودًا قبل تراكم الكتل المكونة الأولى لكوكبنا[1].

يُعدّ التركيب النظائري الأولي للماء في النظام الشمسي ذا أهمية بالغة لفهم أصل الماء على الأجرام السماوية، ولكنه لا يزال مجهولًا رغم الدراسات العديدة. في هذه الدراسة، نستخدم التركيب النظائري للهيدروجين في شوائب غنية بالكالسيوم والألومنيوم (CAIs) من النيازك البدائية، وهي أقدم صخور النظام الشمسي، لتحديد التركيب النظائري للهيدروجين في الماء عند بداية تكوّن النظام الشمسي. نُقدّم هنا التركيب النظائري للهيدروجين في معادن جافة ظاهريًا من شظايا شوائب غنية بالكالسيوم والألومنيوم (CAIs) محصورة داخل شوائب غنية بالكالسيوم والألومنيوم (CAIs) كانت منصهرة سابقًا. تتميز المعادن الأولية بنسب D/H منخفضة للغاية، حيث تصل قيم $\delta D$ إلى -850‰، مما يُشير إلى احتجاز الهيدروجين السديمي. أما المعادن الغنية بالحديد المؤكسد، والتي تشكّلت قبل التقاط الشظايا، فتُشير إلى وجود خزان غاز سديمي ذي ضغط أكسجين أعلى بكثير من القيمة الشمسية، ونسبة D/H ضمن نطاق 20% من نسبة D/H في محيطات الأرض. ترتبط

[1] ( https://www.cnrs.fr/en/press/earths-water-was-around-earth

نظائر الهيدروجين أيضًا بنظائر الأكسجين والنيتروجين، مما يشير إلى أن خزانات العناصر المتطايرة على الكواكب قد تشكلت خلال أول $2 \times 10^5$ سنة من عمر النظام الشمسي، خلال حقبة تكوين شوائب الكالسيوم والألومنيوم الرئيسية. نقترح أن التركيب النظائري لمياه النظام الشمسي الداخلي قد استقر أثناء انهيار نواة السحابة الشمسية الأولية نتيجةً لاختلاط هائل بمياه بين النجوم[1].

[1] J. Aléon, D. Lévy, A. Aléon-Toppani, H. Bureau, H. Khodja & F. Brisset, Determination of the initial hydrogen isotopic composition of the solar system, Nature Astronomy volume 6, pages 458–463 (2022)

## ربما كانت الأرض القديمة "عالماً مائياً" بدون يابسة

تشير أبحاث جديدة إلى أن الأرض القديمة كانت عالمًا مائيًا، يكاد يخلو من اليابسة[1]. وقد يكون لهذا الأمر دلالات بالغة الأهمية على نشأة الحياة وتطورها. فبينما يُغطى سطح الأرض اليوم بنحو 70% من الماء، تُشير الأبحاث الجديدة إلى أن كوكبنا كان عالمًا محيطيًا حقيقيًا قبل حوالي 3 مليارات سنة. في ذلك الوقت، لم تكن سوى جزر متناثرة تخترق سطح المحيط المالح، إن وُجدت أي يابسة أصلًا.

استند العلماء في نتائجهم إلى عينات صخرية فريدة عُثر عليها في منطقة بانوراما غرب أستراليا. ولأن الصخور تحمل بصمات البيئات التي تشكلت فيها، فقد حدد الباحثون أن هذه الصخور تشكلت في نظام فتحات حرارية مائية في قاع البحر قبل حوالي 3.24 مليار سنة. وعلى مر العصور، انقلبت الصخور وانكشفت، مما أتاح للعلماء دراسة ماضي الأرض المائي من على اليابسة. وقادهم هذا إلى استنتاج مفاده أن الأرض القديمة ربما كانت كوكبًا غارقًا بالماء دون وجود أي يابسة تُذكر.

كتب مؤلفو الدراسة الجديدة، التي نُشرت في الثاني من مارس في مجلة[2] "Nature Geoscience": "ربما كانت الأرض في بداياتها، دون قارات ناشئة، أشبه بعالم مائي، مما شكّل قيدًا بيئيًا هامًا على نشأة الحياة وتطورها على الأرض، فضلًا عن احتمال وجودها في أماكن أخرى". على الرغم من وفرة محيطات الأرض في الوقت الحاضر، لا تزال العديد من الألغاز تحيط بأصولها. هل احتوت الأرض دائمًا على الماء، أم أنه وصل إليها لاحقًا؟ وإذا كان لاحقًا، فكم من الوقت؟ وهل كان مصدر الماء المذنبات، أم الكويكبات، أم شيء آخر؟

لا يزال العلماء يفكرون في هذه الأسئلة وغيرها. وذلك لأن الأدلة - مثل المعادن القديمة المسماة الزركون، والتي يبدو أنها تشكلت في بيئة مائية - تشير بوضوح إلى أن الأرض كانت تحتوي على الماء منذ حوالي 4.4 مليار سنة، بعد نشأة كوكبنا مباشرة. إنه تاريخ محيطي طويل. مع ذلك، لا يزال من غير الواضح كمية الماء التي كانت موجودة على الأرض في بداياتها. ومن خلال دراسة جزء من قاع المحيط القديم، تمكن الباحثون من استكشاف هذا السؤال.

---

[1] ( https://www.astronomy.com/science/ancient-earth-may-have-been-a-water-world-with-no-dry-land/

[2] ( Benjamin W. Johnson & Boswell A. Wing, Limited Archaean continental emergence reflected in an early Archaean 18O-enriched ocean, Nature Geoscience volume 13, pages 243–248 (2020)

مع ذلك، لا يزال من غير الواضح كمية الماء التي كانت موجودة على الأرض في بداياتها. ومن خلال دراسة جزء من قاع المحيط القديم، تمكن الباحثون من استكشاف هذا السؤال. عندما تتشكل الصخور في الماء، يطبع الماء تاريخه في الحجر. يتكون الماء، أو $H_2O$، دائمًا من الهيدروجين والأكسجين. لكن نظير الأكسجين، أو نوعه، الموجود في الماء يكشف أيضًا عن بعض المعلومات حول البيئة التي تشكل فيها. على سبيل المثال، درجة حرارتها، أو كيفية انتقال الماء بين اليابسة والبحر والهواء عبر الزمن.

يوجد نظيران شائعان للأكسجين. أحدهما خفيف، وهو الأكسجين-16 ($O^{16}$)، الذي يحتوي على ثمانية بروتونات وثمانية نيوترونات. والآخر أثقل، وهو الأكسجين-18 ($O^{18}$)، الذي يحتوي على ثمانية بروتونات وعشرة نيوترونات. يمنح هذان النيوترونان الإضافيان الأكسجين-18 وزنًا إضافيًا، مما يعني أن جزيئات الماء التي تحتوي على $O^{16}$ تتبخر بسهولة أكبر من جزيئات الماء التي تحتوي على $O^{18}$ الأثقل. بالإضافة إلى ذلك، فإن الصخور واليابسة أكثر قدرة على امتصاص $O^{18}$، مما يؤدي إلى إزالته من مخزون البحر.

عندما فحص مؤلفو الدراسة الجديدة عينة من قاع بحر قديم، وجدوا كمية كبيرة من الأكسجين-18 ($O^{18}$)، تفوق في المتوسط ما هو موجود في محيطاتنا الحديثة. ولأن اليابسة تُعدّ خزانًا هائلًا للأكسجين الثقيل، فإن وفرة $O^{18}$ في بدايات الأرض تشير إلى أن مثل هذا الخزان لم يكن موجودًا آنذاك. وقد خلص الباحثون إلى أن السبب الأرجح لوجود فائض من الأكسجين الثقيل في عينتهم هو أن اليابسة لم تكن قد انبثقت بعد من المحيط القديم.

كثيرًا ما يتجادل العلماء حول أصول الكائنات وحيدة الخلية الأولى على الأرض. هل نشأت الحياة أولًا بالقرب من الفتحات الحرارية المائية في المحيط، حيث كان كل من الحرارة والمياه الغنية بالمعادن متوفرين بكثرة؟ أم أنها تشكلت أولًا على اليابسة، ربما بالقرب من البركة الصغيرة الدافئة التي اقترحها داروين؟ هناك طيف واسع من النظريات، وحتى الآن، لا يملك العلماء إجابة قاطعة. مع ذلك، إذا أكدت الأبحاث المستقبلية أن الأرض في بداياتها كانت مغطاة بالكامل بالماء، فإن هذه المعرفة قد تساعد الباحثين على تحسين نظرياتهم حول كيفية نشأة الحياة.

قال بوسويل وينغ Boswell Wing، أستاذ الجيولوجيا بجامعة كولورادو بولدر Colorado Boulder، في بيان: "إن تاريخ الحياة على الأرض يتتبع البيئات المتاحة. فإذا كان لديك عالم مائي، عالم مغطى بالمحيطات، فلن تجد

بيئات جافة متاحة". بمعنى آخر، إذا كانت الأرض مغطاة بالكامل بالماء عند نشأة الحياة، لما كان من الممكن أن تتشكل الحياة على اليابسة أصلاً. وإذا ثبتت صحة ذلك، فسيشير إلى أن الكواكب الخارجية المغطاة بالكامل بالماء قد تكون مواقع مثالية للبحث عن حياة خارج كوكب الأرض. ولكن دعونا لا نستبق الأحداث.

على الرغم من أن عينة قاع البحر الأسترالية هذه تمثل نقطة زمنية واحدة فقط، إلا أنها تغطي مساحة واسعة ومحفوظة جيداً. لذا، ولتتبع نشأة القارات، يأمل الباحثون في إجراء أبحاث مماثلة على عينات صخرية تغطي تاريخ الأرض. تنتظر هذه العينات في أفريقيا وكندا ونيو مكسيكو وأريزونا، وتمتد عبر مليارات السنين من تاريخ الأرض. معًا، سيرويان قصة الوقت الذي توقفت فيه الأرض عن كونها عالمًا مائيًا وبدأت في تقديم اليابسة التي نسكنها اليوم.

## أدلة جديدة تدحض النظريات القديمة المتعلقة بأصل الماء على الأرض

كشف فريق من الباحثين في جامعة أكسفورد[1] عن أدلة حاسمة حول أصل الماء على الأرض. فباستخدام نوع نادر من النيازك، يُعرف باسم الكوندريت الإينستاتيتي، والذي يتميز بتركيب مشابه لتركيب الأرض في بداياتها (قبل 4.55 مليار سنة)، وجدوا مصدرًا للهيدروجين كان ضروريًا لتكوين جزيئات الماء. والأهم من ذلك، أنهم أثبتوا أن الهيدروجين الموجود في هذه المادة كان جوهريًا، وليس ناتجًا عن تلوث. وهذا يشير إلى أن المادة التي بُني منها كوكبنا كانت أغنى بكثير بالهيدروجين مما كان يُعتقد سابقًا.

لولا الهيدروجين، وهو عنصر أساسي في تكوين الماء، لكان من المستحيل على كوكبنا أن يهيئ الظروف اللازمة لدعم الحياة. وقد دار جدل واسع حول أصل الهيدروجين، وبالتالي الماء، على الأرض، حيث يعتقد الكثيرون أن الهيدروجين اللازم قد وصل إليها من الكويكبات القادمة من الفضاء الخارجي خلال المئة مليون سنة الأولى من عمر الأرض. إلا أن هذه النتائج الجديدة تُناقض هذا الاعتقاد، مُشيرةً إلى أن الأرض كانت تمتلك الهيدروجين اللازم لتكوين الماء منذ نشأتها. قام فريق البحث بتحليل التركيب العنصري لنيزك يُعرف باسم LAR 12252، جُمع في الأصل من القارة القطبية الجنوبية. واستخدموا تقنية تحليل العناصر المعروفة باسم مطيافية امتصاص الأشعة السينية القريبة من الحافة (XANES) في مسرع الضوء الماسي في هارويل، أوكسفوردشاير.

وكانت دراسة سابقة، بقيادة فريق فرنسي، قد حددت آثارًا للهيدروجين داخل النيزك، تحديدًا في المواد العضوية والأجزاء غير البلورية من الكوندريتات (أجسام كروية بحجم المليمتر داخل النيزك). مع ذلك، بقي مصير الكمية المتبقية مجهولاً، ما يعني أنه لم يتضح ما إذا كان الهيدروجين أصلياً أم ناتجاً عن تلوث أرضي. اشتبه فريق أكسفورد في أن كميات كبيرة من الهيدروجين قد تكون مرتبطة بالكبريت الوفير في النيزك. وباستخدام السنكروترون، سلطوا شعاعاً قوياً من الأشعة السينية على بنية النيزك للبحث عن مركبات تحتوي على الكبريت.

عند فحص العينة مبدئيًا، ركز الفريق جهوده على الأجزاء غير المتبلورة من الكوندريتات، حيث وُجد الهيدروجين سابقًا. ولكن عند تحليل المادة المحيطة بإحدى هذه الكوندريتات، والمكونة من مادة دقيقة للغاية (أقل من ميكرومتر)، اكتشف الفريق أن المادة نفسها غنية جدًا بكبريتيد الهيدروجين. في الواقع، أظهر تحليلهم

[1] ( https://www.ox.ac.uk/news/2025-04-16-scientists-find-evidence-overturns-theories-origin-water-earth

أن كمية الهيدروجين في المادة أعلى بخمس مرات من كميته في الأجزاء غير المتبلورة. في المقابل، في أجزاء أخرى من النيزك التي كانت بها شقوق وعلامات تلوث أرضي واضحة (مثل الصدأ)، وُجدت كميات ضئيلة جدًا من الهيدروجين أو لم تكن موجودة على الإطلاق. هذا يجعل من المستبعد جدًا أن تكون مركبات كبريتيد الهيدروجين التي اكتشفها الفريق قد نشأت من مصدر أرضي.

بما أن الأرض البدائية كانت تتكون من مادة مشابهة للكوندريتات الإينستاتيتية، فهذا يشير إلى أنه بحلول الوقت الذي أصبح فيه الكوكب المتشكل كبيرًا بما يكفي ليصطدم بالكويكبات، كان قد جمع مخزونًا كافيًا من الهيدروجين لتفسير وفرة المياه على الأرض في الوقت الحاضر. قال توم باريت، طالب الدكتوراه في قسم علوم الأرض بجامعة أكسفورد، والذي قاد الدراسة: "لقد شعرنا بحماس شديد عندما أظهر التحليل أن العينة تحتوي على كبريتيد الهيدروجين - ولكن ليس في المكان الذي توقعناه! نظرًا لأن احتمال أن يكون مصدر كبريتيد الهيدروجين هذا تلوثًا أرضيًا ضئيل للغاية، فإن هذا البحث يقدم دليلًا حاسمًا يدعم نظرية أن الماء على الأرض طبيعي - أي أنه نتاج طبيعي لتكوين كوكبنا."

أضاف الأستاذ المشارك جيمس برايسون (قسم علوم الأرض، جامعة أكسفورد)، المؤلف المشارك للدراسة: "يُعدّ السؤال الأساسي لعلماء الكواكب هو كيف تشكّلت الأرض على ما هي عليه اليوم. نعتقد الآن أن المادة التي بُني عليها كوكبنا - والتي يُمكننا دراستها باستخدام هذه النيازك النادرة - كانت أغنى بكثير بالهيدروجين مما كنا نعتقد سابقًا. تدعم هذه النتيجة فكرة أن تكوّن الماء على الأرض كان عملية طبيعية، وليس نتيجةً لضربة عشوائية من الكويكبات المائية التي قصفت كوكبنا بعد تكوّنه."

## ربما تكون الأرض قد تشكلت بكمية من الماء تكفي لملء المحيطات ثلاث مرات

ربما وُلد كوكبنا رطبًا. متى وكيف حصلت الأرض على مياهها؟ سؤالٌ مفتوح في علم الكواكب. تشير دراسة حديثة للنيازك القادمة من النظام الشمسي الداخلي إلى أن الماء ربما وصل مع الصخور التي شكلت الكوكب[1]. وفقًا لبعض نماذج تكوين الكواكب، كان من المفترض أن تكون الأرض في بداياتها جافة تمامًا: نظريًا، كانت الشمس الفتية شديدة الحرارة بحيث لم تسمح بتراكم كميات كبيرة من الجليد أو الماء السائل على الصخور التي شكلت فيما بعد الأرض والكواكب الداخلية الأخرى. يوجد نوع من النيازك الحديثة - يُسمى الكوندريت الإينستاتيتي - يُشبه تلك الصخور التي سبقت الأرض. ولأن هذه النيازك كانت تُعتبر جافة، فقد افترض العديد من الباحثين أن مياه الأرض وصلت بعد فترة طويلة من تكوينها عبر نيازك أكثر رطوبة وُلدت على مسافة أبعد من الشمس.

قامت لوريت بياني، من جامعة لورين في فرنسا، وزملاؤها بتحليل 13 نيزكًا من نوع الإينستاتيت الكوندريتي، وقاسوا محتواها من الهيدروجين كمؤشر على وجود الماء. ووجدوا أن هذه الصخور كانت أكثر رطوبة بكثير مما كان متوقعًا، حيث احتوت على ما يعادل 0.08 إلى 0.54 بالمئة من الماء وزنًا. تقول بياني: "تُعد هذه النيازك من أفضل النماذج المتوفرة لدينا لتكوين الأرض، وهي ليست جافة كما كنا نعتقد. من المحتمل أن يكون هذا الماء قد دخل في تكوين الأرض خلال عملية تكوينها بأكملها". بناءً على قياسات الفريق، إذا كانت الأرض قد بُنيت من نيازك الإينستاتيت الكوندريتية، فمن الممكن أن تكون قد وفرت ما يقارب ثلاثة أضعاف كمية الماء الموجودة في محيطات الكوكب حاليًا. وتضيف بياني: "إذا كانت هذه المادة قد وفرت الماء للأرض، فمن المحتمل أيضًا أنها كانت موجودة في تكوين عطارد والزهرة والمريخ". ربما كانت كواكب المجموعة الشمسية الداخلية مليئة بالماء منذ البداية.

يمكن أن تشير وفرة العناصر الكيميائية للأرض ونسبها النظائرية إلى المواد التي شكلت الأرض. توفر نيازك الإينستاتيت الكوندريتية (EC) تطابقًا نظائريًا جيدًا للعديد من العناصر، ولكن من المتوقع ألا تحتوي على ماء لأنها تشكلت في النظام الشمسي الداخلي الحار. وهذا يتطلب أن يكون ماء الأرض من مصدر مختلف، مثل المذنبات. قام بياني وزملاؤه بقياس محتوى الهيدروجين ونسب الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) في 13 نيزكًا من نيازك الإينستاتيت الكوندريتية (انظر مقال بيسلير). ووجدوا كمية هيدروجين أكبر بكثير مما هو شائع،

[1] Piani, L. et al. 2020. Earth’s water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. Science. 369 (6507): 1110–1113

بنسبة D/H قريبة من تلك الموجودة في وشاح الأرض. وبدمج هذه البيانات مع النماذج الكيميائية الكونية، أظهروا أن معظم ماء الأرض ربما يكون قد تشكل من الهيدروجين الذي حملته نيازك الإينستاتيت الكوندريتية.

نيازك الكوندريت الإينستاتيتية (EC) بتركيب نظائري مشابه للصخور الأرضية، وبالتالي قد تكون ممثلة للمادة التي شكلت الأرض. يُفترض أن نيازك الكوندريت الإينستاتيتية خالية من الماء لأنها تشكلت في النظام الشمسي الداخلي. لذلك، يُعزى وجود مياه الأرض عمومًا إلى إضافة لاحقة لجزء صغير من المواد المائية، مثل نيازك الكوندريت الكربونية، التي نشأت في النظام الشمسي الخارجي حيث كان الماء أكثر وفرة. نُبين أن نيازك الكوندريت الإينستاتيتية تحتوي على كمية كافية من الهيدروجين لتزويد الأرض بما لا يقل عن ثلاثة أضعاف كتلة الماء في محيطاتها. تتطابق التركيبات النظائرية للهيدروجين والنيتروجين في نيازك الكوندريت الإينستاتيتية مع تلك الموجودة في وشاح الأرض، لذا فمن المحتمل أن تكون الكويكبات الشبيهة بنيازك الكوندريت الإينستاتيتية قد ساهمت بهذه العناصر المتطايرة في قشرة الأرض ووشاحها.

## أصل مياه الأرض: الوراثة الكوندريتية بالإضافة إلى انبعاث الغازات من السديم وتخزين الهيدروجين في اللب

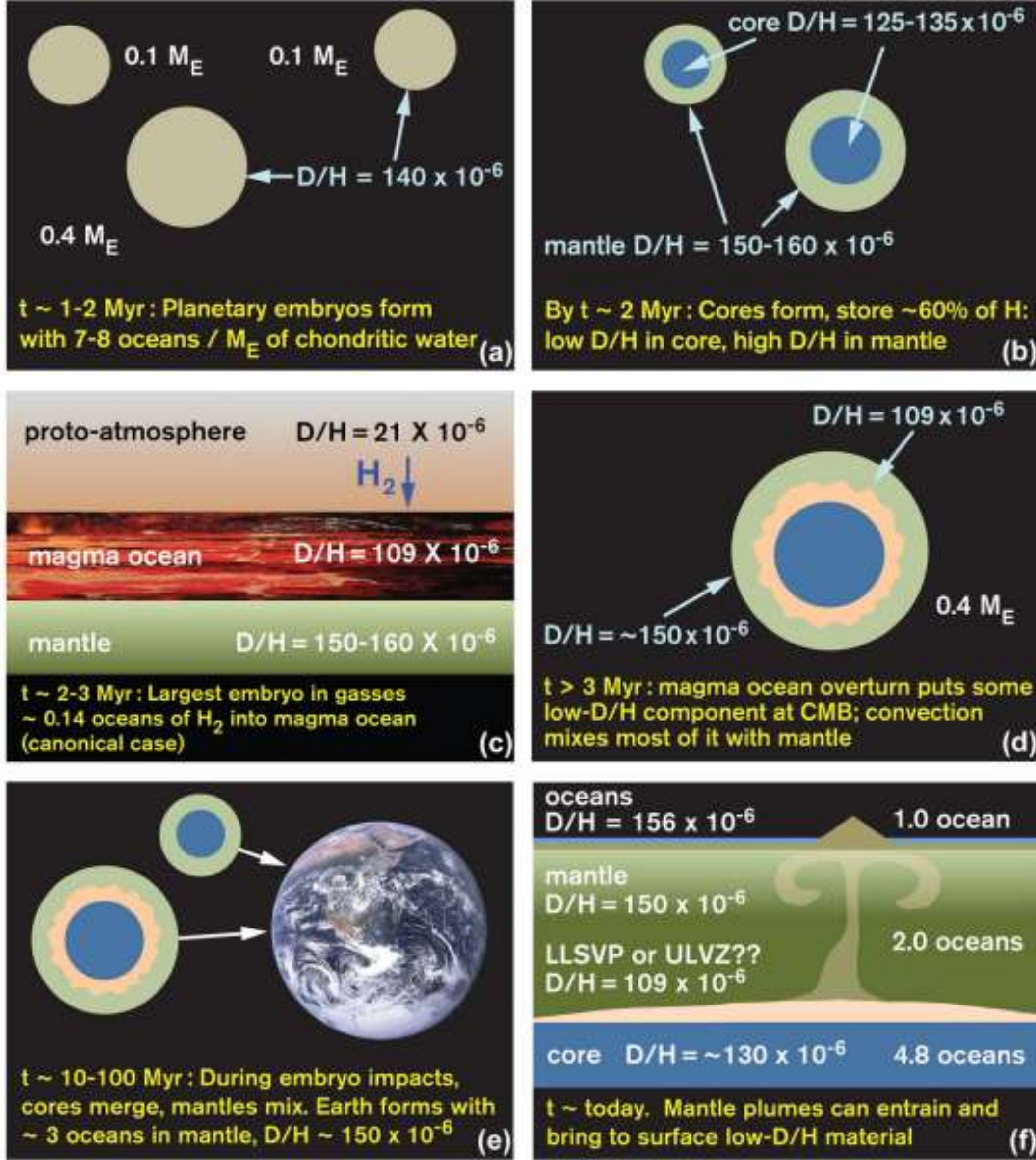
لطالما انتاب الناس فضولٌ حول أصل الماء على الأرض[1] (أو الهيدروجين). وقد حظي السديم الشمسي بأقل قدرٍ من الاهتمام بين النظريات القائمة، على الرغم من كونه الخزان الرئيسي للهيدروجين في نظامنا الشمسي المبكر. نقدم هنا نموذجًا أوليًا لأصل الماء على الأرض، يُحدد كميًا مساهمة السديم الشمسي بالإضافة إلى مساهمة الكوندريت chondrites، وهي اللبنات الأساسية للأرض. يأخذ النموذج في الاعتبار ذوبان الهيدروجين السديمي في محيطات الصهارة الأرضية المبكرة، والتفاعل بين الهيدروجين وقطرات الحديد داخل محيط الصهارة. لم تُسفر هذه العمليات عن نقل أعدادٍ لا تُحصى من ذرات الهيدروجين من الوشاح إلى اللب فحسب، بل ولّدت أيضًا فرقًا ملحوظًا في التركيب النظائري للهيدروجين (نسبة H/1H2) بين الوشاح واللب. يُنتج تطبيق النموذج على المعرفة الحالية حول هيدروجين الأرض أفضل توليفاتٍ من مساهمات السديم والكوندريت في الماء على الأرض. وقد وجدنا أن جزيئًا واحدًا تقريبًا من كل 100 جزيء ماء على الأرض مصدره السديم الشمسي. يخفي كوكبنا معظم مياهه في باطنه، حيث يوجد ما يقارب محيطين في الوشاح وأربعة إلى خمسة محيطات في اللب. تشير هذه النتائج إلى حتمية تكوّن الماء على الكواكب الصخرية الكبيرة بما يكفي في الأنظمة خارج المجموعة الشمسية.

تدعم التطورات الحديثة في نظرية تكوّن الكواكب وقياسات انخفاض نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في مواد الوشاح العميق فرضية أن السديم الشمسي مصدر لبعض هيدروجين الأرض. نقدم هنا نموذجًا جديدًا لأصل مياه الأرض يأخذ في الاعتبار كلًا من الماء الكوندريتي وانبعاث الهيدروجين من السديم. من المرجح أن أكبر جنين تكوّن منه الأرض كان يحتوي على محيط من الصهارة أثناء استمرار السديم الشمسي، والذي ربما يكون قد امتص غازات السديم. يأخذ النموذج في الاعتبار تفاعلات هدرجة الحديد أثناء تكوّن لب الأرض كآلية لعزل الهيدروجين في اللب وتجزئة نظائر الهيدروجين في الوقت نفسه. من خلال تحديد معلمات عامل التجزئة النظيرية ونسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين الأولية في المادة الكوندريتية للأرض، نستكشف التأثيرات المشتركة لذوبان العناصر والتجزئة النظيرية للهيدروجين في الحديد. وبملاءمة النموذج مع القيدين الرئيسيين (وجود ما يعادل ثلاثة محيطات من الماء في وشاح الأرض وعلى سطحها؛ ونسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في المادة

---

[1] Jun Wu, Steven J. Desch, Laura Schaefer, Linda T. Elkins-Tanton, Kaveh Pahlevan, Peter R. Buseck, Origin of Earth's Water: Chondritic Inheritance Plus Nebular Ingassing and Storage of Hydrogen in the Core, Journal of Geophysical Research: Planets, Volume123, Issue10 October 2018 Pages 2691-2712

السيليكاتية للأرض تقارب $150 \times 10^{-6}$)، يبحث النموذج عن أفضل الحلول من بين حوالي 10000 تركيبة مختلفة من المساهمات الكوندريتية والسديمية. ووجدنا أن انبعاث كمية صغيرة من الهيدروجين، عادةً ما يزيد عن 0-0.5 محيط من الهيدروجين السديمي، مطلوب بشكل عام، مكملاً بذلك ما يعادل سبعة إلى ثمانية محيطات من المساهمات الكوندريتية. يدخل حوالي 60% من إجمالي الهيدروجين إلى اللب، ومن المحتمل أن تؤدي التجزئة النظيرية المصاحبة إلى خفض نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في اللب إلى حوالي $130 \times 10^{-6}$. قد تحتوي مواد المحيطات الصهارية المتبلورة على نسبة $D/H \approx 110 \times 10^{-6}$. وتفسر نتائج النمذجة هذه بسهولة انخفاض نسبة D/H في مواد حدود اللب والوشاح، وتفسر مخزون الأرض من النيون والهيليوم الشمسي.




نظرة عامة على نموذجنا لكيفية اكتساب الأرض لمياهها. (أ) تراكمت الأرض من أجنة ذات تركيزات مائية ونسب ديوتيريوم/هيدروجين مماثلة لتلك الموجودة في النيازك الكوندريتية. (ب) تمايزت هذه الأجنة وخزنت هيدروجينًا خفيفًا نسبيًا في نواتها، مما رفع نسبة الديوتيريوم/الهيدروجين في أغلفتها. (ج) تراكمت أكبر الأجنة لغلاف جوي بدائي وحافظت على محيط من الصهارة انتشر فيه هيدروجين السديم. (د) تبلور محيط الصهارة لأكبر الأجنة وانقلب، مما أدى إلى مزج الهيدروجين الخفيف في الغلاف، ولكن بشكل غير كامل. (هـ) مع تراكم الأجنة الأصغر، انضمت أغلفتها إلى غلاف الأرض البدائية، واندمجت نواتها مع نواة الأرض البدائية. (و) يحتوي غلاف الأرض اليوم على ما يقارب ثلاثة محيطات من الماء في غلافه وسطحه، بمتوسط نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين ≈ 150 × $10^{-6}$، وما يقارب 4.8 محيطات من الهيدروجين في لبّه، بنسبة ديوتيريوم إلى هيدروجين ≈ 130 × $10^{-6}$. يمكن لأعمدة الغلاف أن تأخذ عينات من مواد ذات نسبة ديوتيريوم إلى هيدروجين منخفضة من حدود اللب والغلاف. ULVZ = منطقة السرعة المنخفضة للغاية؛ LLSVP = مقاطعة كبيرة ذات سرعة قص منخفضة.

نفترض أن الأرض تراكمت من أجنة كوكبية بأحجام مختلفة، بدءًا من أجنة أصغر حجمًا بكتلة $0.1\ M_E$ >، وصولًا إلى جنين أكبر بكتلة تصل إلى $0.4\ M_E$. نفترض أن هذه الأجنة تشكلت من مواد احتوت في البداية على نسبة ماء مميزة للكوندريتات العادية والكوندريتات الإينستاتيتية enstatite chondrites، حوالي 0.1% وزنيًا، مما كان سيوفر للأرض ما يقارب أربعة محيطات من الماء. ربما احتوت الأجنة أيضًا على مواد كوندريتية كربونية ذات نسبة ماء أعلى. يُفترض أن هذه الأجنة تشكلت بسرعة، ربما عن طريق تراكم الحصى، في غضون فترات زمنية تقل عن بضعة ملايين من السنين، بحيث تشكلت خلال عمر السديم الشمسي وتعرضت للغاز.

نتيجةً للتسخين الإشعاعي الناتج عن تحلل $^{26}Al$، خضعت هذه الأجنة لعملية تمايز سريعة بين المعادن والسيليكات. ربما فقدت الأجنة الصغيرة، ذات الأحجام المشابهة لسيريس، جزءًا من محتواها المائي أثناء عملية التمايز وبعدها. مع ذلك، من المرجح أن يكون هذا الفقدان نسبة ضئيلة فقط من إجمالي المحتوى المائي في جميع مواد تراكم الأرض. أحد أسباب هذا الاحتمال هو أن تراكم هذه الأجنة المُكوِّنة للأرض بعد تكوُّنها كان سريعًا، ما لم يُتح وقتًا كافيًا لتسرب كمية كبيرة من الماء من هذه الأجنة الصغيرة المتمايزة. إضافةً إلى ذلك، لم يكن من الضروري فقدان الماء من الأجسام الصغيرة المتمايزة إذا كانت تقع خارج خط التجمد.

نتيجةً للتمايز الحاصل في أغلفة هذه الأجنة، تفاعل الماء ($H_2O$) مع فقاعات الحديد لتكوين هيدريدات الحديد، والتي يُتوقع أن تكون مستقرة عند ضغوط أعلى من 4 Gpa ودرجات حرارة أعلى من 700 كلفن. وعندما غاصت هذه الفقاعات إلى لبّ الأجنة، احتُفظ بهذا الهيدروجين وعُزل بسبب الظروف المرتفعة. نفترض أن هذه العملية أدت إلى تجزئة نظائر الهيدروجين، مما وضع هيدروجينًا خفيفًا نسبيًا في اللبّ ورفع نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) في الغلاف، وهو افتراض يتوافق مع الملاحظة القائلة بأن نطاق قيم D/H المتاحة في نيازك اليوكريت (سارافيان وآخرون، 2014) أعلى عمومًا من نطاقها في الكوندريتات الكربونية.

بافتراض أن أكبر جنين كوكبي بلغ كتلة تتراوح بين $0.3–0.4\ M_E$~ خلال عمر السديم الشمسي، نفترض أنه اكتسب غلافًا جويًا بدائيًا من غاز $H_2/He$ من السديم الشمسي، بضغط سطحي يتراوح بين 1 و10 بار. ساهم هذا الغلاف الجوي البدائي في تغطية الكوكب والحفاظ على محيط من الصهارة. نفترض أن كمية إضافية من الهيدروجين، على شكل جزيئات $H_2$ و$H_2O$، تعادل بضعة أعشار من المحيط، ذابت في محيط الصهارة، مما أدى إلى انخفاض نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين فيه. كما ذابت الغازات النبيلة، وخاصة الهيليوم والنيون، في محيط الصهارة خلال هذه المرحلة.

بعد تبدد السديم الشمسي وتبريد محيط الصهارة منخفض الديوتيريوم/الهيدروجين وتصلبه، يُفترض أنه تبلور جزئيًا، مُكَوِّنًا تراكمات متأخرة التصلب ذات كثافة أعلى من متوسط كثافة الوشاح الصخري. وقد غاصت المادة الأكثر كثافة إلى حدود اللب والوشاح، بينما اختلطت التراكمات ذات الكثافة المتوسطة مع الوشاح السفلي غير المنصهر. هذه المادة الأكثر كثافة، الغنية بالحديد، والمنخفضة جدًا في نسبة الديوتيريوم/الهيدروجين، حتى لو انصهرت، من غير المرجح أن تكون قد شاركت في تيارات الحمل الحراري في الوشاح إلا على شكل خيوط. لذلك، خلال التصادمات المتتابعة اللاحقة التي أضافت تدريجيًا كتلة إلى أكبر نواة لتشكيل الأرض النهائية، يُتوقع أن تكون هذه المادة قد نجت من أحداث محيط الصهارة المتعددة، حتى من إعادة انصهار الوشاح بالكامل المحتملة الناتجة عن الاصطدام العملاق الأخير الذي شكّل القمر. ونتيجةً لذلك، قد يتواجد اليوم عند حدود اللب والوشاح، وربما يرتبط بمناطق السرعة المنخفضة للغاية (ULVZs) أو مناطق السرعة المنخفضة الكبيرة (LLSVPs).

أخيرًا، تتكون الأرض اليوم مما يلي: لبٌّ يحتجز أكثر من نصف هيدروجين الأرض، بنسبة D/H منخفضة نسبيًا تبلغ حوالي $D/H \approx 130 \times 10^{-6}$ ($\delta D \approx -165‰$)؛ ووشاحٌ يحوي معظم ما تبقى من محيطين تقريبًا من الهيدروجين، بنسبة D/H تبلغ حوالي $D/H \approx 147 \times 10^{-6}$ ($\delta D \approx -56‰$؛ كلوغ وآخرون، 2013)؛ وغلافٌ مائيٌّ سطحيٌّ يحوي محيطًا واحدًا من الماء بنسبة D/H تبلغ $D/H = 156 \times 10^{-6}$ ($\delta D = +1.5‰$). بعبارة أخرى، يوجد بين الوشاح والسطح ما يقارب ثلاثة محيطات من الماء بمتوسط نسبة D/H يبلغ $D/H = 150 \times 10^{-6}$. إذا لم يكتمل اختلاط مواد محيط الصهارة المتبلورة، فإن مواد محيط الصهارة المتبلورة غير المختلطة ذات نسبة D/H منخفضة جدًا (حوالي $D/H \approx 109 \times 10^{-6}$، $\delta D \approx -300‰$) ستتواجد الآن عند حدود اللب والوشاح. ويمكن أن تحمل أعمدة الوشاح الناشئة عند حدود اللب والوشاح عينات من مواد محيط الصهارة المتبلورة أو مواد الوشاح التي تبادلت نظائريًا مع اللب؛ وفي كلتا الحالتين، قد تحتوي هذه المواد على نسبة D/H تتراوح بين $D/H \approx 100-130 \times 10^{-6}$ ($\delta D \approx -358$ إلى $-165‰$).

يُراعي نموذجنا الشامل لأصل مياه الأرض، ولأول مرة، تأثيرات التجزئة النظائرية الناتجة عن ذوبان الهيدروجين في المعادن واحتجازه في اللب. واستنادًا إلى سلوك المؤشرات، نرجح أن تكون نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في اللب أخف بنحو 10% من نسبتها في الوشاح. نفترض أن الأرض اكتسبت ما بين بضعة إلى عشرات المحيطات من الماء من النيازك الكوندريتية، ومعظمها من النيازك الكوندريتية الكربونية. وبالاستناد إلى أحدث نظريات

تكوين الكواكب، التي تُشير إلى التكوين السريع (أقل من مليوني سنة) للأجنة الكوكبية، نرجح اندماج بضعة أعشار من محيط الهيدروجين من السديم الشمسي في محيطات الصهارة للأجنة التي شكلت الأرض.

وبناءً على النمذجة، نرجح سيناريوهات ساهمت فيها النيازك الكوندريتية بما بين سبعة إلى ثمانية محيطات من الهيدروجين، واندماج حوالي 0.06 من محيط الهيدروجين، ما لم يحتوي لب الأرض على كمية كبيرة من الكربون (أكثر من 1% وزنيًا). تتفق هذه النماذج مع وجود ما يقارب أربعة إلى خمسة محيطات من الهيدروجين محتجزة في اللب، بنسبة D/H قد تصل إلى $120 \times 10^{-6}$، وثلاثة محيطات تقريبًا من الهيدروجين في الوشاح والسطح، بنسبة D/H تساوي $150 \times 10^{-6}$.

إن وجود غالبية هيدروجين الأرض في لبها، كما هو متوقع، لا يُسهم إلا بشكل طفيف في النقص الملحوظ في كثافة اللب، وهي نتيجة تتوافق مع المعرفة الحالية بالعناصر الخفيفة في اللب. ولا تتأثر استنتاجاتنا بشكل كبير بالشكوك المعقولة في الكميات الديناميكية الحرارية التي تحكم ذوبان الهيدروجين في الحديد. ونُفسر انخفاض الذوبان غير المعتاد الذي قاسه كليسي وآخرون (2018) بأنه يعكس تأثير الكربون. وبأخذ هذا التأثير في الاعتبار، وبافتراض أن نسبة الكربون في لب الأرض أقل من 1% وزنيًا، لم نجد اختلافات كبيرة مقارنةً بالحالة المعروضة هنا.

يُفسر كلٌ من اندماج الهيدروجين الخفيف نظائريًا وتجزئة نظائر الهيدروجين أثناء احتجازه في اللب، انخفاض نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H). إما أن تكون القياسات لمواد محيط الصهارة المتصلبة التي تحتوي على هيدروجين السديم الشمسي المندمج، أو لمواد الوشاح السفلي التي تبادلت نظائريًا مع اللب. يتطلب اختبار نموذجنا والتمييز بين هذين السيناريوهين قياسات دقيقة، وإن كانت صعبة تقنيًا، لذوبان الهيدروجين في الحديد، ومعامل التجزئة النظائرية ($\alpha$) عند ضغوط عالية. كما أن وضع قيود أكثر دقة على نسب الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) الكلية لمختلف النيازك الكوندريتية من شأنه أن يُحسّن النموذج.

يُفسر نموذجنا التركيبات الشمسية المُبلغ عنها للهيدروجين والغازات النبيلة في وشاح الأرض. على وجه الخصوص، يبدو أن انبعاث الغازات من السديم عبر الذوبان المتوازن آلية فعالة لتوفير كميات كافية من النيون-22 والهيليوم-3 لمخزوناتهما الأرضية، شريطة ألا تقل كتلة محيط الصهارة عن 0.1 مليون كتلة شمسية. وسيؤدي توسيع نطاق هذه الآلية ليشمل غازات نبيلة أخرى إلى اختبار النموذج بشكل أعمق.

## نظرية جديدة لتفسير أصل الماء على الأرض

توصل فريق بحثي بقيادة عالم فلك من مرصد باريس (PSL) التابع لمختبر الدراسات الفضائية والأجهزة في الفيزياء الفلكية[1] (LESIA - Observatoire de Paris - PSL / CNRS / Sorbonne Université / Université Paris Cité) إلى آلية جديدة محتملة لوصول الماء إلى الأرض، مما يمثل تحولًا واعدًا عن النظريات السابقة. استنادًا إلى العديد من عمليات الرصد للنظام الشمسي، بالإضافة إلى رصد أقراص الحطام خارج المجموعة الشمسية بواسطة تلسكوب ألما الراديوي.

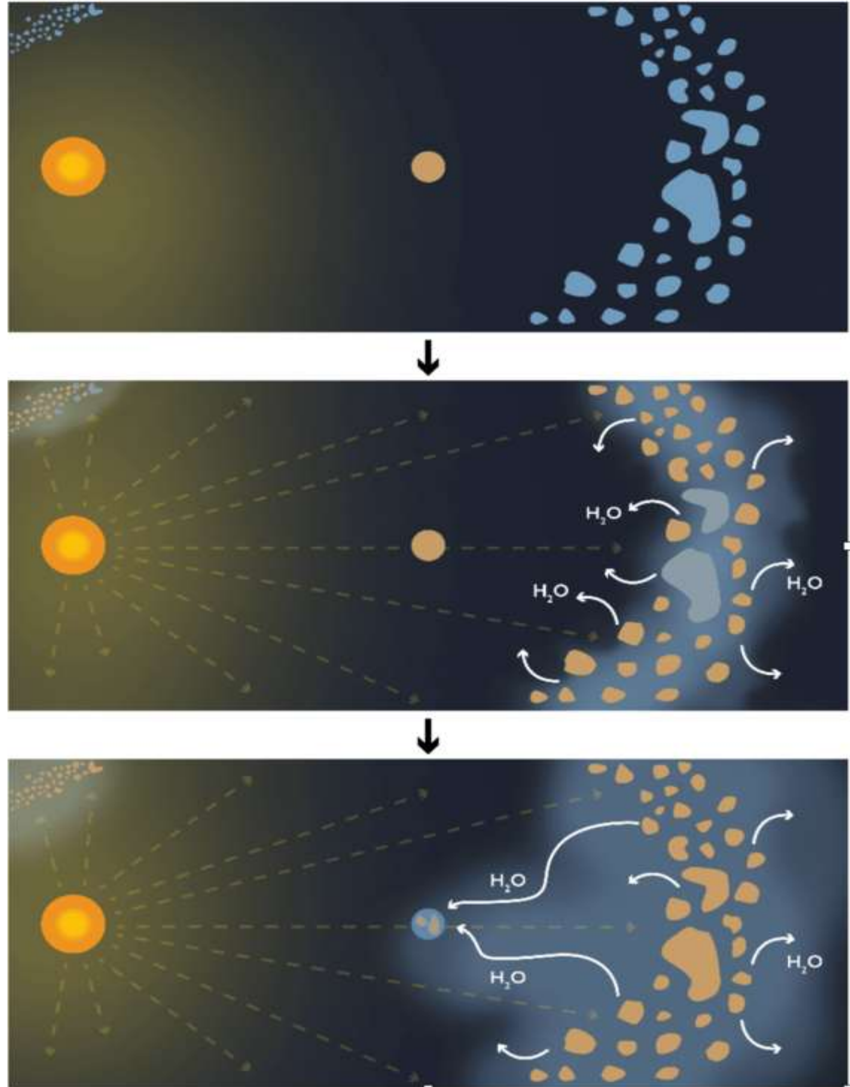
يُعد الماء عنصرًا أساسيًا للحياة على الأرض، ومع ذلك يعتقد العلماء أن الأرض في بداياتها كانت خالية منه. ونظرًا لقربها الشديد من الشمس، كانت كوكبنا شديد الحرارة بحيث لا يمكنه الاحتفاظ بالماء عند نشأته. لذا، تشير النظريات الحالية إلى تدفق الماء من الخارج خلال المئة مليون سنة الأولى من تاريخ الأرض. حتى الآن، كانت النظرية السائدة تفترض اصطدام أجسام جليدية شبيهة بالمذنبات بالأرض، حاملةً معها الماء. إلا أن هذا السيناريو يتطلب آليةً كونيةً معقدةً، حيث تدفع هذه الأجسام الجليدية نحو الأرض في لحظةٍ محددةٍ وبكميةٍ كافية. وبكل تأكيد، يُعد هذا السيناريو موضع شكٍ من حيث متانته وشموليته لجميع الأنظمة الكونية الخارجية.

استنادًا إلى بياناتٍ دقيقةٍ من قياسات النظائر في الغلاف الجوي للأرض، فضلًا عن رصد الكويكبات مؤخرًا (ولا سيما نتائج مهماتٍ فضائيةٍ اقتربت من الكويكبات، مثل هايابوسا 2 Hayabusa 2وأوزيريس-ريكس OSIRIS-REx)، تم وضع نموذجٍ جديدٍ لتطور حزام الكويكبات، ثم تم اختباره على بياناتٍ أرضية. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء عمليات رصد للأقراص الخارجية المتعلقة بحزام الكويكبات لدينا باستخدام تلسكوب ALMA الراديوي، لاختبار مدى عالمية آلية إمداد المياه الجديدة هذه، والتي يمكن تطبيقها بنجاح على مجموعة متنوعة من الأنظمة الخارجية.

تقترح الدراسة الجديدة آلية بديلة، أقل عشوائية ولا تتطلب اصطدامات مباشرة بالأرض. إذا كانت الكويكبات، كما نعتقد اليوم، قد تشكلت جليدية في قرص بدائي بارد، فمع اختفاء هذا القرص الفتي، بدأت الكويكبات، مع ارتفاع درجة حرارتها، بإطلاق جليدها تدريجيًا على شكل بخار ماء. ثم شكّل بخار الماء هذا قرصًا جديدًا،

[1] ) https://observatoiredeparis.psl.eu/a-new-theory-to-explain-the.html

يتكون في معظمه من الماء، يحيط بحزام الكويكبات ويدور حول الشمس. تحت تأثير القوى الديناميكية، انتشر قرص بخار الماء هذا تدريجيًا، ليصل في النهاية إلى الكواكب الداخلية للمجموعة الشمسية، بما فيها الأرض. وعندما وجدت الكواكب نفسها في هذا المحيط من بخار الماء، تمكنت من امتصاص جزء منه، مما ساهم في تكوين المحيطات. يمكن لهذه الآلية أيضًا أن تفسر وجود الماء على كواكب أخرى في المجموعة الشمسية. وبفضل قابليتها للتطبيق على نطاق واسع، فإنها توفر سبيلًا واعدًا لتحديد الكواكب الخارجية القادرة على احتواء الماء، وربما الحياة.




عرضٌ تفصيلي لنموذج جديد لتوزيع الماء على الكواكب الداخلية للنظام الشمسي، بما فيها الأرض. بعد خمسة ملايين سنة من نشأة الشمس، أطلقت كويكبات الحزام الرئيسي بخار الماء تحت تأثير الطاقة الشمسية. انتشر هذا البخار تدريجيًا في النظام الشمسي الداخلي، ليُحيط بالكواكب التي استوعبت جزءًا منه مُشكّلةً محيطات بعد ما بين 10 و100 مليون سنة. Sylvain Cnudde/Observatoire de Paris – PSL/LESIA

## آلية خالية من الصدمات لتوصيل المياه إلى الكواكب الأرضية والكواكب الخارجية

هذا البحث، يقترح دراسة آلية جديدة قد تُوفر الماء للكواكب دون اصطدامات[1] .الفكرة الأساسية هي أن حزام الكويكبات البدائي لا بد أنه احتوى على كويكبات جليدية، نظرًا لأن معظم كويكبات النوع C (التي تُمثل الجزء الأكبر من كويكبات الحزام الرئيسي) مُرطبة. كان من المُفترض أن يتسامى هذا الجليد المائي خلال بضعة عشرات من ملايين السنين، مُشكلاً قرصًا من الغاز الذي انتشر لاحقًا نحو الكواكب الداخلية وجلب لها الماء.

لذا، تعتمد الآلية على تكوين حزام الكويكبات وكتلته، وهناك عدة احتمالات. ربما وُلد حزام الكويكبات الفتي ضخمًا، بكتلة تصل إلى ألف ضعف كتلته الحالية البالغة حوالي ~4 × 10 $M\oplus^{-4}$، وفقًا لنموذج MMSN. كما يُحتمل أيضًا أنه وُلد بكتلة منخفضة ثم امتلأ لاحقًا بأجرام من المناطق الخارجية للنظام الشمسي. يتألف حزام الكويكبات الحالي من فئتين رئيسيتين، حيث تكثر أجسام الفئة S في الحزام الرئيسي الداخلي، بينما تهيمن أجسام الفئة C على الحزام الرئيسي الخارجي، مع وجود اختلاط كبير بين الفئتين. ترتبط أجسام الفئة C طيفيًا بالكوندريتات الكربونية، التي تحتوي عادةً على حوالي 10% من الماء من حيث الكتلة. ربما كانت أجسام الفئة C الفتية غنية بجليد الماء، وكان حزام الكويكبات الفتي يتمتع بمعدل تبخر مرتفع نسبيًا، مما أدى إلى تكوين قرص من غاز الماء.

بل من المحتمل وجود أقراص من الماء الغازي خارج نظامنا الشمسي، في أنظمة الكواكب الخارجية. ويتكون هذا القرص من الغاز المنبعث من أحزمة الكويكبات الخارجية. مع ذلك، لم يتم رصد هذه الأقراص المائية بعد، ولكن من المرجح أن يتم ذلك في المستقبل القريب. في الواقع، سيصبح الأمر حينها مشابهًا لأحزمة كايبر الخارجية exo-Kuiper، وهي المكافئ لحزام كايبر في النظام الشمسي حول النجوم الأخرى، والتي يُرصد حاليًا أنها تُطلق كميات كبيرة من الغاز، وخاصة أول أكسيد الكربون والكربون. لم تتنبأ النماذج السابقة لتكوين الكواكب بهذه الظاهرة، ولم تُكتشف إلا مؤخرًا، لكنها تُظهر وجود جليد أول أكسيد الكربون في المناطق الخارجية للأنظمة الكوكبية الخارجية، وقدرته على التسامي وتكوين أقراص غازية. يمكن لهذه الأقراص أن تنتشر باتجاه الكواكب

[1] Quentin Kral, Paul Huet, Camille Bergez-Casalou, Philippe Thébault, Sébastien Charnoz and Sonia Fornasier, An impact-free mechanism to deliver water to terrestrial planets and exoplanets, Astronomy & Astrophysics, Volume 692 (December 2024) A&A, A70

الخارجية، حاملةً معها أول أكسيد الكربون أو الكربون أو الأكسجين الغازي في عملية تراكم متأخرة وفعّالة نسبيًا.

أما أقرب رصد لقرص من الماء في نظام كوكبي خارجي، فقد جاء من رصد تلسكوب سبيتزر Spitzer للنجم HD 69830 (وهو نجم لا يختلف كثيرًا عن شمسنا، وله حزام كويكبات على بُعد حوالي وحدة فلكية واحدة)، مما يُشير إلى احتمال وجود جليد مائي في حزام الكويكبات الخاص به، وأنه يتسامى، مُشكلاً قرصًا غازيًا. قد ينتشر الماء الغازي أيضًا نحو المناطق الداخلية للأنظمة الكوكبية الخارجية، موفرًا الماء للكواكب الخارجية في المنطقة الصالحة للسكن. هذه آلية جديدة قد تكون عامة في جميع الأنظمة الكوكبية، ونستكشفها في هذه الورقة من منظور النظام الشمسي. نبين أن المرافق الحالية، مثل مرصد ألما، قد تكون قادرة على رصد هذه الأقراص الغازية، وبالتالي اختبار هذه النظرية الجديدة باستخدام بيانات من خارج النظام الشمسي.

يرتكز نموذجنا على فرضية أن الكويكبات الفتية كانت جليدية. هذه الفرضية، التي تُشكّل أساس هذه الورقة البحثية، ربما لم تُدرس بتفصيل كافٍ، حتى في حالة النماذج السابقة (التي تعتمد على الاصطدامات) والتي استندت إلى فرضية مماثلة.

عندما ننظر إلى الكويكبات اليوم، نجدها خالية في معظمها من جليد الماء، باستثناء سيريس، أكبر الكويكبات، حيث رُصد جليد الماء المكشوف محليًا، وربما ثيميس، وكذلك سيبيل (65)، وهما جسمان كبيران يبلغ قطرهما حوالي 200 كيلومتر في حزام الكويكبات الخارجي. يحتوي الكوكب القزم سيريس على حوالي 20% من جليد الماء في الطبقة القريبة من سطحه، ويُقدّر متوسط محتوى الماء في قشرته بأكثر من 60% حجمًا. علاوة على ذلك، رُصدت مصادر محلية لبخار الماء. إضافة إلى ذلك، يبدو أن سيريس يمتلك غلافًا جليديًا، وربما يحتوي على محيط من الماء تحت سطحه. لذا، تشير الملاحظات الحالية إلى أن جليد الماء لا يُرصد إلا على عدد قليل من الكويكبات الكبيرة في الأجزاء الخارجية من حزام الكويكبات. مع ذلك، نلاحظ أن الجليد على السطح قصير الأمد، لأن حزام الكويكبات بأكمله يقع ضمن خط الثلج، ما يعني أن مخزون الجليد يأتي من أعماق أكبر. علاوة على ذلك، بات من المعروف أن رصد جليد الماء على أسطح الأجسام المظلمة ليس بالأمر السهل. في الواقع، تُظهر مهمات الرصد المباشر، مثل مهمة روزيتا، بوضوح أنه حتى على المذنبات، يصعب رصد الجليد على سطحها. بالنسبة للمذنب P/Churyumov-Gerasimenko67، أوضح فورناسير أن سطحه يتكون في معظمه من مواد حرارية، وأن جليد الماء المكشوف الذي رُصد خلال مهمة روزيتا لا يُمثل سوى 0.1% من سطح النواة. إضافة

إلى ذلك، يبلغ متوسط حجم كتل جليد الماء المكشوفة على سطح P/CG67 حوالي متر مربع واحد، ما يعني ضرورة توفر دقة مكانية عالية لرصدها. مع ذلك، توجد عدة حجج قوية تشير إلى أنه حتى وإن كان من الصعب رصد الجليد على السطح، فإن جليد الماء متوفر بكثرة أسفل الطبقة العلوية الغنية بالمواد المقاومة للحرارة، على عمق يتراوح بين 10 سم و1 متر، كما يتضح بعد انهيارات المنحدرات وتكوّن الجرف، أو من خلال بصمة نيزك فيلاي على صخرة.

على الرغم من ندرة الجليد على سطح الكويكبات، تُظهر ملاحظات النيازك أن بعضها غني بالمعادن المائية. ونظرًا لعدم احتواء النيازك المرصودة اليوم على جليد مائي، يُعرَّف محتواها المائي بأنه كمية الماء التي يُمكن إعادة تكوينها بعد تسخين المواد الصلبة؛ وبالتالي، تتحول إلى خليط غازي، حيث يُفترض إعادة اتحاد الهيدروجين والأكسجين لتكوين الماء. ثمة فصل واضح بين الحزام الداخلي، الذي تهيمن عليه كويكبات من النوع S الفقيرة بالماء، والحزام الخارجي الذي تهيمن عليه كويكبات من النوع C الغنية بالماء. تبلغ نسبة الماء في كويكبات النوع S 0.1% فقط، بينما تبلغ في كويكبات النوع C حوالي 10%. لذلك، يُعتقد عمومًا أن معظم الماء الذي يصل إلى الأرض يأتي من كويكبات النوع C. تجدر الإشارة إلى أن الماء في الكويكبات المرصودة حاليًا يكون على شكل معادن مائية وليس على شكل جليد. مع ذلك، من المهم التأكيد على أن تركيب الكويكبات الحالية قد يختلف اختلافًا كبيرًا عن تركيبها في النظام الشمسي المبكر. فمن المحتمل أن معظم الكويكبات (على الأقل من النوع C الغني بالمعادن المائية) كانت تتكون في البداية من جليد مائي تبخر على مدار 4.6 مليار سنة من تطور النظام الشمسي. وتشير عدة أدلة إلى هذا الاتجاه.

تُظهر النماذج أن خط تجمد الماء، الذي يقع حاليًا خارج حزام الكويكبات، كان أقرب بكثير في الماضي، مما سمح بتكوّن جليد الماء في جميع أنحاء حزام الكويكبات. ويحدث خط التجمد عند درجات حرارة تتراوح بين 145 و170 كلفن، وتُظهر عمليات المحاكاة الحديثة للأقراص الكوكبية الأولية أن خط التجمد يتحرك بسرعة نحو الداخل ليستقر عند حوالي وحدتين فلكيتين بعد بضعة ملايين من السنين، ولا يتغير إلا عندما يتبدد القرص إلى موقع جديد يتجاوز 3 وحدات فلكية. بل من المحتمل أن يكون خط التجمد قد تحرك نحو الداخل إلى أقل من وحدتين فلكيتين مع تباطؤ التراكم وبرودة القرص، ثم استقر (أو تحجر) عند حوالي 2.3 إلى 2.7 وحدة فلكية، وهو ما يتوافق مع موضع الفصل بين الكويكبات الغنية بالماء والفقيرة به في الحزام الحالي. يحدث التحجر في مرحلة القرص الكوكبي الأولي بسبب إعاقة كوكب المشتري لتدفق الحصى عند وصوله إلى كتلة

العزل، بحيث حتى لو انخفضت درجة حرارة الحزام الرئيسي الداخلي، فلن يمتلئ بالمواد الجليدية، ولن يعود جليد الماء إلى تلك الكويكبات. ومن المثير للاهتمام أن هذا السيناريو يتنبأ بأن الأنظمة خارج المجموعة الشمسية التي لا تحتوي على كواكب عملاقة ستكون أغنى بكثير بالماء في مناطقها الداخلية. ثمة احتمال آخر هو أن عدم استقرار الدوران المغناطيسي لم يكن نشطًا في المناطق الداخلية للحزام؛ علاوة على ذلك، وبسبب المنطقة الميتة الناتجة، يمكن أن تتراكم المادة خارج هذه المنطقة، فتصبح أكثر كتلة وتصل إلى درجات حرارة أعلى (بسبب التسخين اللزج)، مما يدفع خط التجمد إلى الخارج أكثر مما هو عليه في نموذج اضطراب الدوران المغناطيسي الكامل.

ثمة طريقة أخرى لفهم المزيد عن الجليد في حزام الكويكبات، وهي دراسة الأنظمة خارج المجموعة الشمسية التي تحتوي على أحزمة كويكبات دافئة. يمكن دراسة محتوى الماء في بداية مرحلة القرص الكوكبي الأولي في نطاق بضعة وحدات فلكية داخلية، كما يمكن استكشاف امتداد خط تجمد الماء بدقة عالية. في الواقع، رصدت العديد من عمليات رصد بخار الماء خطوطًا باردة ودافئة في بعض الأقراص الفتية بواسطة تلسكوبات هيرشل وسبيتزر وجيمس ويب الفضائي، وكذلك من الأرض. وهذا ليس بالأمر المفاجئ، إذ يُتوقع انطلاق بخار الماء بالقرب من خط التجمد مع هجرة الغبار أو الحصى إلى داخل القرص، وهو تنبؤ مهم لنماذج الأقراص أثناء تكوين الكواكب. والأكثر إثارة للاهتمام هو اكتشاف جليد الماء في مرحلة لاحقة، في مرحلة قرص الحطام، عندما يكون النجم على التسلسل الرئيسي ويشبه القرص حزام الكويكبات لدينا. في الواقع، يوجد في النظام المحيط بالنجم HD 69830 من نوع KOV، والذي يتراوح عمره بين 3 و10 مليارات سنة، حزام كويكبات خارج المجموعة الشمسية على بُعد وحدة فلكية واحدة تقريبًا (مما يجعله مشابهًا لنظامنا الشمسي)، حيث تم رصد جليد الماء على حبيبات الغبار الناتجة عن التصادمات في الحزام الدافئ. وهذا أمرٌ مثيرٌ للدهشة نوعًا ما، نظرًا لقدم النظام ودرجة الحرارة عند وحدة فلكية واحدة أعلى من درجة حرارة تبخر الماء. مع ذلك، يُحتمل أن يكون الماء قد تبخر في هذا الحزام، مما يُسبب عتامةً معينةً للضوء الساقط، ويمنع وصول الكثير من الحرارة إلى الكويكبات الخارجية، ما يجعلها باردةً بما يكفي للاحتفاظ بجليد الماء. ونشير إلى أنه من المرجح أن تُظهر العديد من الأنظمة التي تحتوي على أحزمة كويكبات خارجية وجود جليد الماء، لا سيما في الأنظمة الأحدث عمرًا.

يُقدّر إجمالي كمية الماء على سطح الأرض بما يتراوح بين 2.3 و $23 \times 10^{-4} M_{\oplus}$ مليون كتلة شمسية، بما في ذلك الماء الموجود في الوشاح. واليوم، يُعدّ معدل هروب الهيدروجين من الأرض منخفضًا جدًا (~3 kg/s). ويُعزى هذا

المعدل إلى انخفاض نسبة مزج بخار الماء (~1–5 ppm في الغلاف الجوي العلوي)، نتيجةً لما يُعرف بظاهرة المصيدة الباردة (أي تكوّن السحب) عند التروبوبوز. لذا، فمن غير المرجح أن يكون إجمالي كمية الماء على سطح الأرض، بعد انتهاء عملية التراكم، قد تغيّر بشكل ملحوظ على مدى فترات زمنية جيولوجية طويلة بسبب دورة الماء، والمصيدة الباردة، وبالتالي انخفاض معدل الهروب. مع ذلك، خلال حقبة الأركي، ربما كان معدل هروب الهيدروجين أعلى بنحو مئتي ضعف، وكان يتحكم فيه نسبة مزج غاز الميثان ($CH_4$). إذ يخضع غاز الميثان بالفعل للتحلل الضوئي في الغلاف الجوي العلوي، وكان أكثر وفرة (على الأرجح 100–1000 ppm) خلال حقبة الأركي Archean مقارنةً باليوم. تبلغ نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) الحالية في مياه المحيطات معروفة بدقة عالية، حيث تبلغ $1.5576 \pm 0.0001 \times 10^{-4}$ مقارنةً بمعيار فيينا القياسي لمياه المحيطات (VSMOW). ولا يزال الجدل قائمًا حول ما إذا كانت هذه القيمة تمثل غالبية مياه الأرض، نظرًا لوجود بعض القياسات التي تشير إلى انخفاض نسبة D/H في مواد الوشاح العميق، والتي قد تكون أكثر بدائية. تمثل نسبة D/H مزيجًا من جميع المصادر التي يُحتمل أنها ساهمت في خزانات مياه الأرض، وتُستخدم بكثرة لتحديد مصادر مياهها. ويبدو أن أفضل تطابق لنسبة D/H الحالية في مياه المحيطات هو مع نسبة النيازك الكربونية، وخاصةً من النوعين CI وCM، مما يشير إلى أنها كانت المصدر الرئيسي لمياه الأرض.

... في هذه الورقة، وجدنا أن $10^{-5}$ M⊕ (السيناريو 1، كتلة منخفضة) و $3 \times 10^{-3}$ Me (السيناريو 2، كتلة عالية) من الماء كان من الممكن أن تتراكم على الأرض، في الغالب بين 20 و30 مليون سنة بعد ولادة الشمس، عبر آلية النقل اللزجة التي افترضناها. لذلك، يمكن لسيناريو الكتلة العالية (السيناريو 2) أن ينقل كل مياه الأرض، وحتى في حالة الكتلة المنخفضة (السيناريو 1)، لا يمكن إهمال هذا المكون المنقول عبر القرص (حوالي 4% من محيط الأرض). من المهم أيضًا ملاحظة أن معظم محتوى الماء في الكويكبات يتسامى بسرعة في نموذجنا، ومن المتوقع أن تكون نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في الحالة الغازية مماثلة لتلك الموجودة في الحالة الصلبة. لذا، ضمن آليتنا، ينبغي أن تكون نسبة الكثافة إلى الصلابة (D/H) مماثلة لتلك الموجودة في الأجسام الجليدية الأولية في الحزام الرئيسي، أي الكويكبات من النوع C بشكل أساسي، والتي تقترب نسبة الكثافة إلى الصلابة فيها من نسبة الماء على الأرض. ونشير إلى أن آليتنا لا تتطلب اصطدامًا لنقل الماء، وسيكون من المثير للاهتمام إيجاد طرق للتمييز بين آليتي النقل بالاصطدام والنقل اللزج.

## تحديد التركيب النظائري الأولي للهيدروجين في النظام الشمسي

لفهم كيفية نشأة الحياة، يدرس العلماء كيمياء الكربون والماء. ففي حالة الماء، يتتبعون الأشكال المختلفة، أو النظائر، لذرات الهيدروجين والأكسجين المكونة له عبر تاريخ الكون، كما لو كانوا يبحثون عن كنز ثمين. وقد تتبع باحثون من المركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي (CNRS)، وجامعة باريس ساكلاي، وهيئة الطاقة الذرية الفرنسية (CEA)، وجامعة باو ومنطقة باي دو لادور (UPPA)، بدعم من المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي (MNHN)، مسار التركيب النظائري للماء وصولاً إلى بداية النظام الشمسي، في المناطق الداخلية حيث تشكلت الأرض والكواكب الأرضية الأخرى. وقد فعلوا ذلك من خلال تحليل أحد أقدم النيازك في نظامنا الشمسي، باستخدام طريقة مبتكرة طُوّرت خصيصًا لدراستهم. وتُظهر بياناتهم وجود خزانين للغاز خلال أول 200 ألف سنة من عمر نظامنا الشمسي، حتى قبل تشكل الأجنة الكوكبية الأولى. كان أحد هذه الخزانات يتألف من الغاز الشمسي الذي نشأت منه جميع مواد نظامنا الشمسي. وبفضل النيزك، تمكن العلماء من قياس سجله مباشرةً لأول مرة على الإطلاق. أما خزان الغاز الثاني فكان غنيًا ببخار الماء، ويحمل بالفعل البصمة النظائرية للماء الأرضي. وقد تشكل نتيجة تدفق هائل للماء بين النجوم إلى المناطق الداخلية الساخنة للنظام الشمسي، عند انهيار الغلاف بين النجوم وتكوّن القرص الكوكبي الأولي. ويشير وجود هذا الغاز مبكرًا، بتركيب نظائري مشابه للأرض، إلى أن ماء الأرض كان موجودًا قبل تراكم الكتل المكونة الأولى لكوكبنا[1].

بما أن الماء عنصر أساسي في تكوين الكواكب ونشأة الحياة، فقد خضع أصله وتركيبه الكيميائي - ولا سيما تركيبه النظائري للهيدروجين والأكسجين - لدراسات ونماذج مكثفة في أجرام النظام الشمسي. تشير نظائر الهيدروجين إلى انبعاث جزيئات غنية بالديوتيريوم من الوسط بين النجوم البارد/القرص الكوكبي الأولي الخارجي إلى المناطق الداخلية حيث تشكلت الكواكب الأرضية، وقد استُخدمت على نطاق واسع كمؤشر لأصل الماء. مع ذلك، فإن التركيب النظائري الأولي للماء في القرص الكوكبي الأولي غير معروف، لذا غالبًا ما تعتمد النماذج على الرصد الفلكي للأنظمة النجمية البعيدة التي لا تزال قيد التكوين. إضافةً إلى ذلك، تفترض معظم النماذج أقراص تي-تاوري الثابتة، وتتجاهل حقيقة أن نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في الماء ربما تكون قد تطورت خلال مرحلة تكوين القرص. مع ذلك، أظهرت بعض النماذج تأثير هذه المرحلة المبكرة ليس فقط على توزيع نسب الديوتيريوم إلى الهيدروجين، بل أيضًا على الخصائص النظائرية والكيميائية الأخرى للمواد

[1] ( https://www.cnrs.fr/en/press/earths-water-was-around-earth

الكوكبية المبكرة. لفهم نظام الديوتيريوم/الهيدروجين في النظام الشمسي وأصل الماء في الأجرام الكوكبية فهمًا كاملًا، نحتاج إلى معرفة التركيب النظائري للهيدروجين كما هو مسجل في أقدم مواد النظام الشمسي التي تشكلت خلال مرحلة تكوين القرص، بينما كان لب السحابة ما قبل الشمسية لا يزال ينهار.

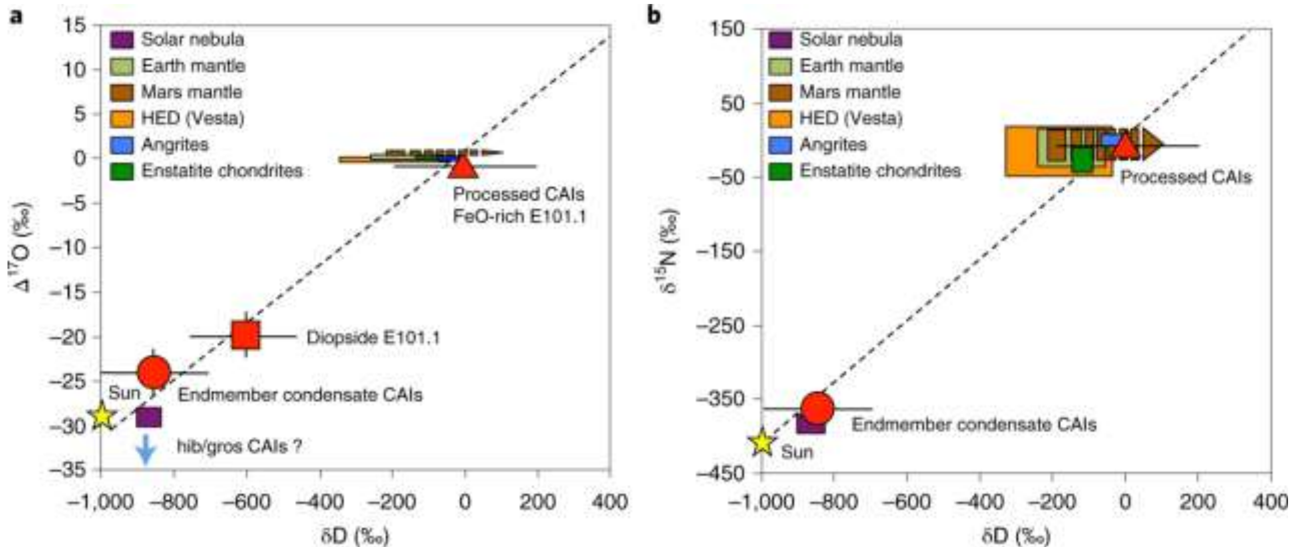
يُعدّ الكالسيوم والأكسجين والسيليكون والحديد العناصر الرئيسية لإنتاج الديوتيريوم عن طريق التقشر. ونظرًا لكونها عناصر أساسية في جميع معادن الزينوليث xenolith، بينما يقتصر فائض الديوتيريوم على تجمعات الكيرشستينيت kirschsteinite ذات الحبيبات الدقيقة، فلا يُمكن عزو هذا الأخير إلى التقشر. كما أن ارتباط فائض الديوتيريوم بانخفاض محتوى الهيدروجين يستبعد حدوث تغير في سائل غني بالديوتيريوم، الأمر الذي كان سيؤدي إلى نسب عالية من الديوتيريوم إلى الهيدروجين المرتبطة بمحتوى عالٍ من الهيدروجين. في المقابل، يُفسَّر فائض الديوتيريوم بشكل جيد بالتجزئة الحركية أثناء الانتشار داخل البلوري لذرات الهيدروجين الناتج عن فقدان الهيدروجين، بغض النظر عن نوع الجزيء المفقود. وقد تم إثبات هذه التجزئة الحركية في الجروسولار grossular، وهو نيسوسيليكات nesosilicate آخر غني بالكالسيوم، حيث نُسبت التجزئة إلى هجرة العيوب النقطية البروتونية الناتجة عن فقدان الماء. تُظهر دراسة المعادن أن الكيرشستينيت ذو الحبيبات الدقيقة قد تشكل أثناء احتجاز الزينوليثات عن طريق اختزال الكيرشستينيت ذي الحبيبات الخشنة. يحتوي الأخير على نطاق واسع من محتوى الهيدروجين، ويتوافق أعلى محتوى هيدروجين فيه (حوالي 5000 جزء في المليون) وتركيبه النظائري المشابه للأرض (في حدود 20%) مع تلك الخاصة بالسلف المتوقع من حسابات الفقد الانتشارية. وبالتالي، حدثت عملية الديوتريوم أثناء اختزال الكيرشستينيت ذي الحبيبات الخشنة واحتجاز الصخور الدخيلة بواسطة الجسم المضيف المنصهر جزئيًا. يشير هذا إلى أن الكيرشستينيت ذي الحبيبات الخشنة قد تشكل قبل تراكم الجسم الأم للكوندريت chondrite CV في خزان غاز سديمي مؤكسد بنسبة D/H مشابهة للأرض (في حدود 20%). جميع المعادن من المادة المضيفة من شوائب الكالسيوم والألومنيوم (CAI) لها أيضًا تركيب نظائري مشابه للأرض، بما في ذلك المعادن الغنية بالصوديوم التي تحتوي على محتوى $H_2O$ يصل إلى حوالي 3.5% وزنيًا، والميليليت الناري الذي يحتوي على محتوى $H_2O \geq 5000$ جزء في المليون.

تشير أنظمة نظائر الهيدروجين في 101.1E إلى وجود خزانين غازيين متزامنين خلال المرحلة الأولى من تكوين النظام الشمسي. على الرغم من اختلاف أنواع الهيدروجين $H_2$ في المعادن، وخاصة في المعادن غير المتجانسة[1]، عن تلك الموجودة في الغاز، فإن العلاقة بين نظائر الهيدروجين وحالة الأكسدة والاختزال تدل على أن مكثفات الديوبسيد diopside والأنورثيت anorthite سجلت تركيب غاز الهيدروجين $H_2$ في السديم الشمسي، بينما سجلت المعادن الثانوية الغنية بأكسيد الحديد، وربما الميليليت melilite الناري، تركيب غاز سديم غني بالماء $H_2O$ ذي تركيب نظائري مشابه للأرض. ونظرًا لأن بيئة دافئة ضرورية لتكوين الكيرشستينيت kirschsteinite، فمن المرجح أن الماء $H_2O$ والهيدروجين $H_2$ كانا في حالة توازن نظائري. وقد قمنا بقياس نظائر الأكسجين سابقًا في 101E. أظهرت هذه الدراسة نظامًا نظائريًا مشابهًا، حيث يتميز الديوبسيد المكثف بتركيب نموذجي غني بنظير الأكسجين $^{16}O$- قريب من التركيب الشمسي، بينما تتميز المعادن الغنية بأكسيد الحديد (FeO) والميليليت الناري بتركيب نظائري فقير بنظير الأكسجين $^{16}O$- كوكبي. يُعد هذا النظام النظائري للأكسجين شائعًا في شوائب الكالسيوم والألومنيوم النارية، ويُعزى إلى التفاعلات بين مادة أولية ذات تركيب شمسي وخزان غاز سديمي ذي تركيب كوكبي. وبالتالي، تُظهر نظائر الهيدروجين والأكسجين في شوائب الكالسيوم والألومنيوم تعايش نظائر الهيدروجين والأكسجين ذات تركيبات خفيفة قريبة من التركيب الشمسي ( $\delta D \approx -850‰$ and $\Delta^{17}O \approx -25‰$) في المعادن المكثفة، وتراكيب نظائرية كوكبية ($\Delta^{17}O \sim \delta D \sim 0‰$) في المعادن التي تشكلت في السديم الشمسي. تشير هذه العلاقة إلى أن بخار الماء يحمل التركيب الكوكبي. تُظهر نظائر النيتروجين نظامًا مشابهًا، حيث يمتلك TiN في شوائب الكالسيوم والألومنيوم المكثفة قيمة $\delta^{15}N$ قريبة من قيمة الشمس عند -364‰، بينما تمتلك شوائب الكالسيوم والألومنيوم النارية تركيبًا شبيهًا بالكوكب عند $\delta^{15}N \approx 0‰$. يدل هذا على أن نظائر الهيدروجين والأكسجين والنيتروجين تطورت معًا من تركيب قريب من الشمس إلى تركيب كوكبي خلال تكوين شوائب الكالسيوم والألومنيوم النارية في أول 200,000 سنة من عمر النظام الشمسي، بينما كان الغلاف السحابي ما قبل الشمسي لا يزال في طور الانهيار. كما تُؤكد العلاقة بين نظائر النيتروجين وشذوذات التخليق النووي للمعادن الثقيلة في النيازك الحديدية أن مخزون النيتروجين الكوكبي قد تراكم خلال المراحل الأولى لسقوط المواد بين النجوم.

---

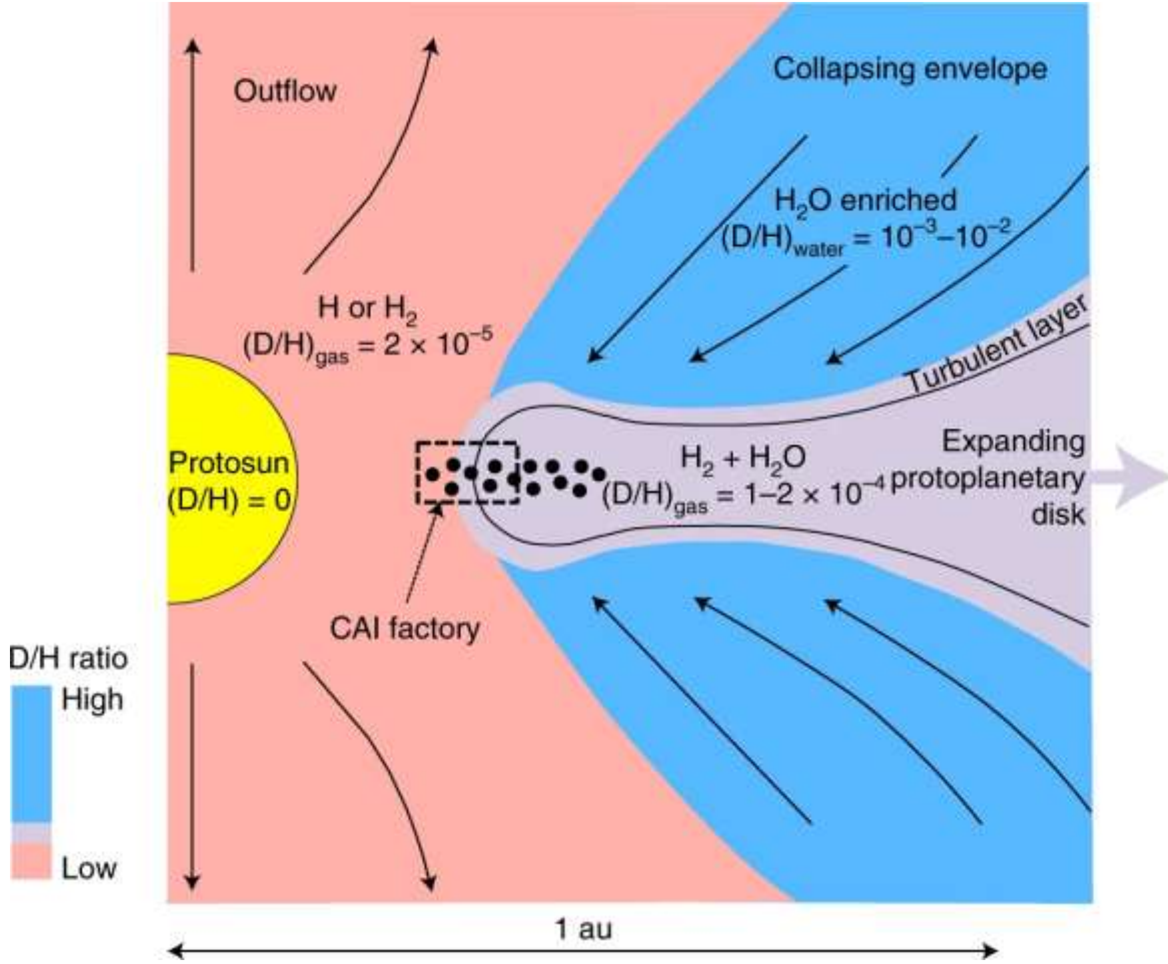
[1] J. Aléon, D. Lévy, A. Aléon-Toppani, H. Bureau, H. Khodja & F. Brisset, Determination of the initial hydrogen isotopic composition of the solar system, Nature Astronomy volume 6 (2022), P. 458–463

لذا، فإن التركيب النظائري للهيدروجين ($D/H \approx 1–2 \times 10^{-4}$) المنتشر في الكواكب الصغيرة الأرضية الكبيرة المتكونة مبكرًا، مثل الجسم الأم للهوارديت-الإيوكريت-الدوجينيت (فيستا) howardites–eucrites–diogenites parent body (Vesta) أو الجسم الأم للأنجريت angrite ، وفي وشاح الأرض والمريخ، قد تم الوصول إليه في السنوات القليلة الأولى من عمر النظام الشمسي، نتيجة لتدفق هائل من المادة بين النجومية المتساقطة مباشرة في النظام الشمسي الداخلي، بدلاً من أن تكون قد تشكلت في قرص كوكبي أولي أكثر تطورًا. ويسمح تراكم المواد البدائية في مراحل مختلفة من السقوط بوجود بعض التباين النظائري بين الكواكب الصغيرة. تشير العلاقة الملحوظة بين نظائر الهيدروجين والأكسجين والنيتروجين في الشمس، ومكثفات شوائب الكالسيوم والألومنيوم، والغاز الكوكبي، إلى أن شوائب الكالسيوم والألومنيوم النارية تشكلت من المادة الشمسية عند الحافة الداخلية للقرص الكوكبي الأولي، وخضعت لمعالجة ما في الغاز الكوكبي. ويتطلب رفع نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في القرص إلى قيمتها الكوكبية، بإضافة الماء بين النجوم بنسبة نموذجية تتراوح بين $10^{-3}$ و $10^{-2}$، زيادة نسبة الجليد إلى الغاز بمقدار يتراوح بين 10 و100 ضعف، مما يزيد بدوره من فاعلية الأكسجين في الغاز بمقدار يتراوح بين 2 و4 مراتب. ويمكن أن يكون الإنتاج الموضعي لفائض الديوتيريوم عن طريق التفاعلات الكيميائية في البلازما فرضية بديلة، شريطة أن يرتبط هذا الإنتاج بتجزئة مستقلة عن الكتلة للأكسجين وتغير في ظروف الأكسدة والاختزال.




**مقارنة بين نظائر الهيدروجين ونظائر العناصر المتطايرة الأخرى في شوائب الكالسيوم والألومنيوم ومكونات الكواكب.**
أ- مقارنة بين نظائر الهيدروجين والأكسجين. ب- مقارنة بين نظائر الهيدروجين والنيتروجين. الرموز الحمراء: شوائب غنية بالكالسيوم والألومنيوم (CAIs). باستثناء مكثف Endmember، تُظهر أشرطة الخطأ على شوائب CAIs انحرافين معياريين (2 s.d.) لنظائر الهيدروجين، وانحرافين معياريين للوسط (2 s.e.m.) لنظائر الأكسجين في المعادن المقابلة، وتُظهر نطاق

القيم في شوائب CAIs واحدة لنظائر النيتروجين. غالبًا ما تكون الأخطاء في بيانات الأكسجين والنيتروجين أصغر من الرموز. يُشير مكثف Endmember إلى أدنى القيم المقاسة في شوائب CAIs المكثفة. بالنسبة للأكسجين، اعتمدنا القيمة النموذجية لمعادن مختلفة في العديد من شوائب CAIs، وتُظهر أشرطة الخطأ النطاق النموذجي لتركيب هذه المعادن. بالنسبة للهيدروجين، اعتمدنا قيمة وخطأ الأنورثيت 101.1E. بالنسبة للنيتروجين، اعتمدنا قيمة وخطأ TiN في شوائب CAIs من نوع Isheyevo. تُوضح الخطوط المتقطعة العلاقة بين الشمس/السديم الشمسي، وشوائب CAIs، والأجرام السماوية. HED، هواردديتس-يوكريتس-ديوجينيتس؛ Hib/gros CAIs، شوائب غنية بالهيبونيت و/أو غنية بالجروسيت




**تمثيل تخطيطي لتوزيع نظائر الهيدروجين في النظام الشمسي الفتي الداخلي أثناء تكوين شوائب الكالسيوم والألومنيوم.** مصنع شوائب الكالسيوم والألومنيوم (CAI) هو منطقة تكوّن شوائب الكالسيوم والألومنيوم على الحافة الداخلية للقرص الكوكبي الأولي في مراحله المبكرة. يُنتج التركيب النظائري للهيدروجين الكوكبي خلال مرحلة انهيار الغلاف النجمي الأولي نتيجة تدفق هائل من المادة بين النجومية المتساقطة مباشرة في النظام الشمسي الداخلي. وحدة فلكية (au).

## علماء الفلك يكتشفون أكبر وأبعد خزان للمياه

اكتشف علماء فلك، من بينهم فريق بقيادة مات برادفورد من مختبر الدفع النفاث التابع لناسا، ثقبًا أسودًا يتغذى على بخار الماء[1]. اكتشف فريقان من علماء الفلك أكبر وأبعد خزان مائي تم رصده في الكون. يحيط هذا الماء، الذي يعادل 140 تريليون ضعف كمية الماء في محيطات العالم، بثقب أسود هائل يتغذى على بخار الماء، يُسمى الكوازار، على بُعد أكثر من 12 مليار سنة ضوئية.

يقول مات برادفورد، العالم في مختبر الدفع النفاث التابع لناسا في باسادينا، كاليفورنيا: "إن البيئة المحيطة بهذا الكوازار فريدة من نوعها، إذ تُنتج هذه الكتلة الهائلة من الماء. وهذا دليل آخر على أن الماء منتشر في جميع أنحاء الكون، حتى في أقدم مراحله". يقود برادفورد أحد الفريقين اللذين حققا هذا الاكتشاف. وقد مُوّل بحث فريقه جزئيًا من قِبل ناسا، ونُشرت نتائجه في مجلة رسائل الفيزياء الفلكية.

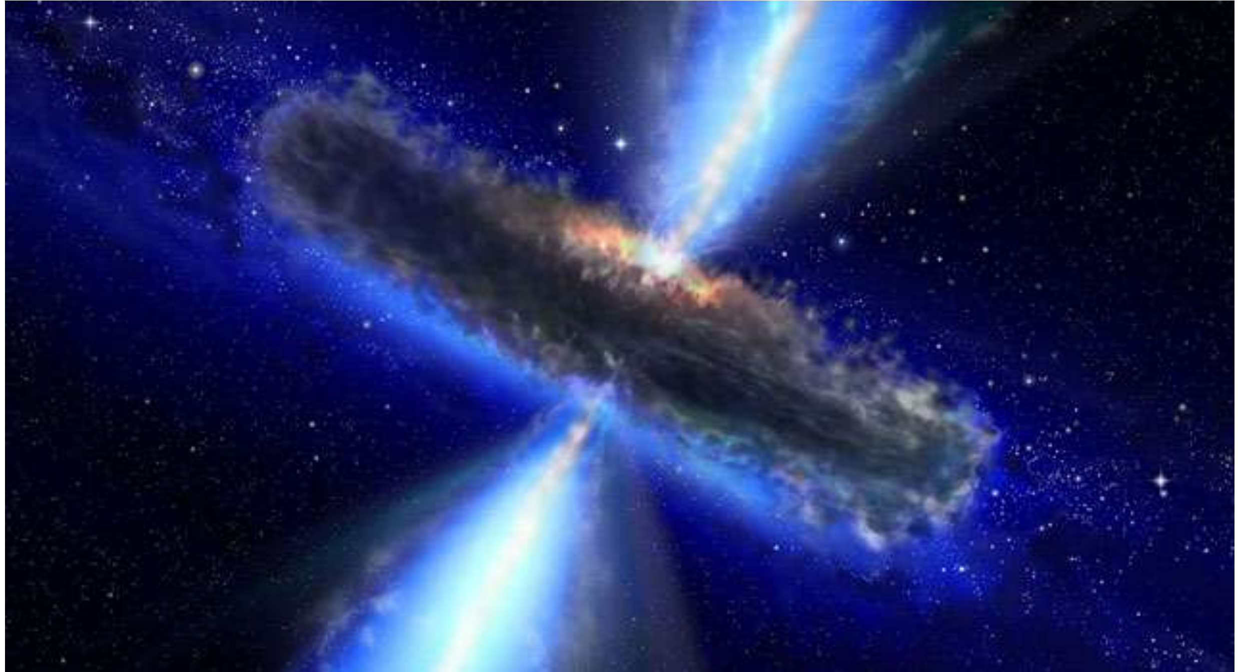
يستمد الكوازار quasar طاقته من ثقب أسود هائل يلتهم باستمرار قرصًا محيطًا به من الغاز والغبار. أثناء التهامها للثقوب السوداء، تقذف الكوازار كميات هائلة من الطاقة. درست مجموعتان من علماء الفلك كوازارًا محددًا يُدعى APM 08279+5255، والذي يحتوي على ثقب أسود تبلغ كتلته 20 مليار ضعف كتلة الشمس، وينتج طاقة تعادل طاقة ألف تريليون شمس.

توقع علماء الفلك وجود بخار الماء حتى في بدايات الكون البعيدة، لكنهم لم يرصدوه على هذه المسافة من قبل. يوجد بخار الماء في مجرة درب التبانة، على الرغم من أن كميته الإجمالية أقل بـ4000 مرة من كميته في الكوازار، لأن معظم مياه مجرة درب التبانة متجمدة في الجليد. يُعد بخار الماء غازًا نادرًا مهمًا يكشف طبيعة الكوازار. في هذا الكوازار تحديدًا، يتوزع بخار الماء حول الثقب الأسود في منطقة غازية تمتد على مساحة مئات السنين الضوئية (السنة الضوئية تساوي حوالي ستة تريليونات ميل). يشير وجود هذا الغاز إلى أن الكوازار يُحيطه بأشعة سينية وأشعة تحت حمراء، وأن هذا الغاز دافئ وكثيف بشكل غير عادي وفقًا للمعايير الفلكية. فعلى الرغم من أن درجة حرارة الغاز تبلغ -63 درجة فهرنهايت (-53 درجة مئوية) وكثافته أقل بـ300 تريليون مرة من كثافة الغلاف الجوي للأرض، إلا أنه لا يزال أكثر سخونة بخمس مرات وأكثر كثافة من 10 إلى 100 مرة مما هو معتاد في مجرات مثل مجرتنا درب التبانة.

---
[1] https://www.jpl.nasa.gov/news/astronomers-find-largest-most-distant-reservoir-of-water

وتشير قياسات بخار الماء وجزيئات أخرى، مثل أول أكسيد الكربون، إلى وجود كمية كافية من الغاز لتغذية الثقب الأسود حتى ينمو إلى حوالي ستة أضعاف حجمه الحالي. ويقول علماء الفلك إن حدوث ذلك غير مؤكد، إذ قد يتكثف جزء من الغاز ليتحول إلى نجوم أو قد يُقذف من الكوازار. بدأ فريق برادفورد Bradford رصده في عام 2008، باستخدام جهاز يُدعى "Z-Spec" في مرصد الموجات المليمترية التابع لمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، وهو تلسكوب قطره 10 أمتار (33 قدمًا) يقع بالقرب من قمة ماونا كيا في هاواي. وأُجريت عمليات رصد لاحقة باستخدام مصفوفة كارما (CARMA)، وهي عبارة عن مجموعة من أطباق الراديو في جبال إنيو Inyo بجنوب كاليفورنيا.

أما المجموعة الثانية، بقيادة داريوس ليس، الباحث الرئيسي في الفيزياء في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ونائب مدير مرصد الموجات المليمترية، فقد استخدمت مقياس التداخل في هضبة بور Bure في جبال الألب الفرنسية للعثور على الماء. في عام 2010، اكتشف فريق ليس الماء مصادفةً في APM 8279+5255، حيث رصدوا بصمة طيفية واحدة. وتمكن فريق برادفورد من الحصول على مزيد من المعلومات حول الماء، بما في ذلك كتلته الهائلة، بفضل رصدهم لعدة بصمات طيفية للماء.



يُصوّر هذا التصميم الفنيّ كوازارًا، أو ثقبًا أسودًا مغذيًا، مشابهًا لـ APM 08279+5255، حيث اكتشف علماء الفلك كميات هائلة من بخار الماء. من المرجح أن يشكّل الغاز والغبار حلقةً حول الثقب الأسود المركزي، مع وجود سحب من الغاز المشحون في الأعلى والأسفل. Credit: NASA/ESA

## الأنهار الجليدية بين النجوم مشروع SPHEREx التابع لناسا يرسم خرائط لمناطق جليدية مجرية شاسعة

نجحت مهمة SPHEREx التابعة لوكالة ناسا (مقياس الطيف الضوئي لتاريخ الكون، وعصر إعادة التأين، ومستكشف الجليد) في رسم خريطة للجليد بين النجوم على نطاق غير مسبوق[1]. وقد غطت هذه المهمة مناطق في مجرتنا درب التبانة تمتد لأكثر من 600 سنة ضوئية، حيث تم العثور على الجليد داخل سحب جزيئية عملاقة - وهي مناطق شاسعة من الغاز والغبار تنهار فيها كتل كثيفة من المادة تحت تأثير الجاذبية، مما يؤدي إلى نشأة النجوم. ونُشرت دراسة تصف هذه النتائج في مجلة الفيزياء الفلكية.

يُعدّ رسم خريطة للبصمات الكيميائية لأنواع مختلفة من الجليد بين النجوم أحد الأهداف الرئيسية لمهمة SPHEREx. ويشمل هذا الجليد جزيئات مثل الماء وثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون، وهي جزيئات حيوية للتفاعلات الكيميائية التي تسمح بنشوء الحياة. ويعتقد الباحثون أن خزانات الجليد هذه، الملتصقة بأسطح حبيبات الغبار الدقيقة، هي المكان الذي يتشكل فيه معظم الماء في الكون ويُخزن. فالماء الموجود في محيطات الأرض - والجليد الموجود في المذنبات وعلى الكواكب والأقمار الأخرى في مجرتنا - ينشأ من هذه المناطق.

قال فيل كورنغوت Phil Korngut، عالم الأجهزة في مشروع SPHEREx التابع لمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (كالتك Caltech ) في باسادينا Pasadena، كاليفورنيا، والمشارك في إعداد الدراسة: "تشبه هذه التجمعات الجليدية الشاسعة أنهارًا جليدية بين النجوم، قادرة على توفير كميات هائلة من المياه للأنظمة الشمسية الجديدة التي ستنشأ في هذه المنطقة. إنها فكرة بالغة الأهمية، فنحن ننظر إلى خريطة للمواد التي قد تتساقط على الكواكب الوليدة، وربما تدعم الحياة في المستقبل".

بفضل قدراته الطيفية، يستطيع مشروع SPHEREx قياس كميات أنواع مختلفة من الجليد والجزيئات، مثل الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، داخل السحب الجزيئية وحولها، مما يساعد العلماء على فهم تركيبها وبيئتها بشكل أفضل. على الرغم من أن التلسكوبات الفضائية، مثل تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا، وتلسكوب سبيتزر المتقاعد، قد رصدت الماء وثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون وجزيئات

---

[1] ( https://www.jpl.nasa.gov/news/interstellar-glaciers-nasas-spherex-maps-vast-galactic-ice-regions
https://science.nasa.gov/mission/spherex/

جليدية أخرى في مجرتنا، فإن مرصد SPHEREx هو أول مهمة تعمل بالأشعة تحت الحمراء مصممة خصيصًا لرصد هذه الجزيئات في جميع أنحاء السماء من خلال المسح الطيفي واسع النطاق الذي يوفره.

"توقعنا رصد هذه الجليديات أمام النجوم الساطعة المنفردة: إذ يعمل ضوء النجم ككشاف ضوئي، كاشفًا أي جليد في الفضاء بيننا وبينه. لكن الأمر مختلف هنا"، هذا ما قاله المؤلف الرئيسي للدراسة، جوزيف هورا، عالم الفلك في مركز الفيزياء الفلكية (CfA) بجامعة هارفارد ومؤسسة سميثسونيان Smithsonian في كامبريدج، ماساتشوستس Massachusetts. وأضاف: "عند النظر على طول مستوى المجرة - حيث تتركز معظم النجوم والغاز والغبار في مجرتنا - نجد الكثير من ضوء الخلفية المنتشر الذي يخترق سحب الغبار بأكملها، ويستطيع مرصد SPHEREx رصد التوزيع المكاني للجليديات التي تحتويها بتفاصيل مذهلة".

يُدار مرصد SPHEREx من قبل مختبر الدفع النفاث التابع لناسا في جنوب كاليفورنيا، وقد أُطلق في 11 مارس 2025، ويتمتع بقدرة فريدة على رصد السماء بـ 102 لون، يمثل كل منها طولًا موجيًا مختلفًا من الأشعة تحت الحمراء، مما يوفر معلومات مميزة عن المجرات والنجوم ومناطق تشكل الكواكب وغيرها من الظواهر الكونية. بحلول أواخر عام 2025، أكمل مشروع SPHEREx أول خريطة من أصل أربع خرائط بالأشعة تحت الحمراء تغطي كامل السماء للكون، ورسم مواقع مئات الملايين من المجرات ثلاثية الأبعاد للمساعدة في الإجابة على أسئلة رئيسية حول الكون، بما في ذلك تلك المتعلقة بأصول الماء والحياة.

باستخدام خرائط SPHEREx لجزيئات جليدية متنوعة، تمكن مؤلفو الدراسة من دراسة أعماق العديد من السحب الجزيئية في منطقتي سيغنوس إكس وسديم أمريكا الشمالية في مجرة درب التبانة. في المناطق الأكثر كثافة، حيث تبلغ كمية الغبار ذروتها، تحجب خيوط داكنة الضوء المرئي المنبعث من النجوم خلفها. كما كشف التلسكوب الفضائي، بفضل عدسته التي تعمل بالأشعة تحت الحمراء، عن أماكن تركز أنواع الجليد المختلفة - التي تمتص أطوال موجية محددة من الأشعة تحت الحمراء التي كانت ستخترق السحب لو كانت تتكون من الغبار فقط - بأقصى كثافة لها.

تدعم هذه النتيجة فرضية أن الجليد بين النجوم يتشكل على سطح جزيئات غبار دقيقة، لا يزيد حجمها عن حجم جزيئات دخان الشموع، وأن المناطق الكثيفة من الغبار تحمي الجليد من الأشعة فوق البنفسجية

الشديدة المنبعثة من النجوم الوليدة. مع ذلك، لا تُعامل جميع أنواع الجليد بالطريقة نفسها في الوسط بين النجوم.

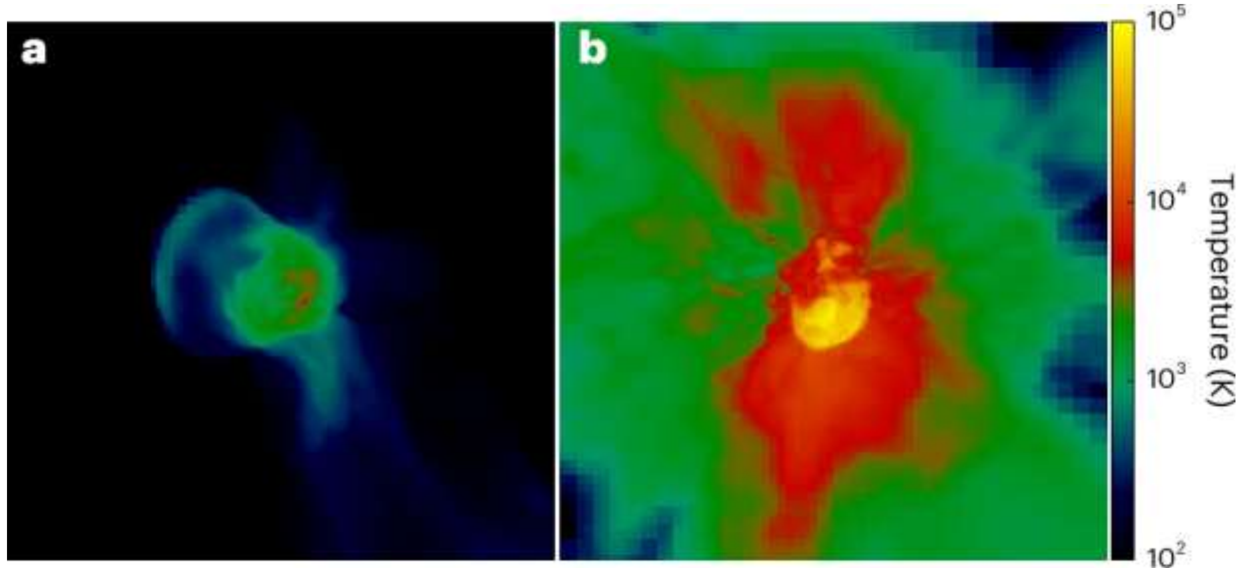
قال غاري ميلنيك Gary Melnick، عالم الفلك في مركز هارفارد-سميثسونيان للفيزياء الفلكية (CfA) والمشارك في إعداد الدراسة: "يمكننا دراسة العوامل البيئية التي تُسهم في اختلاف معدلات تكوّن الجليد عبر مساحات شاسعة من الفضاء بين النجوم. تُتيح لنا مهمة SPHEREx رؤية شاملة تُوفر معلومات جديدة قيّمة لا يُمكن الحصول عليها عند التركيز على منطقة صغيرة." ويضيف ميلنيك أنه ضمن هذا المنظور الواسع، تستطيع SPHEREx القيام بما لا تستطيع المراصد الأرضية القيام به: رصد كميات متفاوتة من الماء وثاني أكسيد الكربون، وهما نوعان من الجليد يستجيبان بشكل مختلف للعوامل البيئية. فعلى سبيل المثال، يؤثر وجود ضوء فوق بنفسجي مكثف من نجوم فتية ضخمة قريبة، أو تسخين حبيبات الغبار بواسطة هذا الضوء، على وفرة أنواع الجليد المختلفة بطرق متباينة.



تكشف هذه الملاحظات التي أجرتها مهمة SPHEREx التابعة لناسا عن تجمعات جليدية هائلة في منطقة تكوّن النجوم Cygnus X في مجرة درب التبانة. يظهر جليد الماء، على شكل هياكل زرقاء ساطعة على اليسار، متراكباً تماماً على ممرات الغبار بين النجوم الداكنة، المعروضة بأطوال موجية مختلفة على اليمين. Credit: NASA/JPL-Caltech/IPAC/Hora et al

## وفرة المياه من المستعرات supernovae العظمى البدائية عند فجر الكون

كانت المستعرات العظمى البدائية (أو من الجيل الثالث) أولى محركات التخليق النووي في الكون، وقد ساهمت في تكوين العناصر الثقيلة اللازمة لتكوين الكواكب والحياة لاحقًا. يُعتقد أن الماء، على وجه الخصوص، عنصرٌ حاسمٌ في الأصول الكونية للحياة كما نفهمها، وقد أظهرت نماذج حديثة أن الماء يمكن أن يتكون في غاز منخفض المعدنية، كما هو الحال في الانزياحات الحمراء العالية[1]. نقدم هنا محاكاة عددية تُظهر أن أول ماء في الكون قد تشكل في مستعرات عظمى من الجيل الثالث ناتجة عن انهيار النوى وعدم استقرار الأزواج عند انزياحات حمراء $z \approx 20$. المواقع الرئيسية لإنتاج الماء في هذه البقايا هي نوى السحب الجزيئية الكثيفة، والتي كانت في بعض الحالات غنية بالماء البدائي بنسب كتلية أقل ببضعة أضعاف فقط من تلك الموجودة في النظام الشمسي اليوم. تُعد هذه النوى الكثيفة والغبارية أيضًا مرشحة محتملة لتكوين الأقراص الكوكبية الأولية. إلى جانب الكشف عن أن أحد المكونات الأساسية للحياة كان موجودًا بالفعل في الكون بعد 100-200 مليون سنة من الانفجار العظيم، تُظهر عمليات المحاكاة التي أجريناها أن الماء كان على الأرجح مكونًا رئيسيًا للمجرات الأولى.

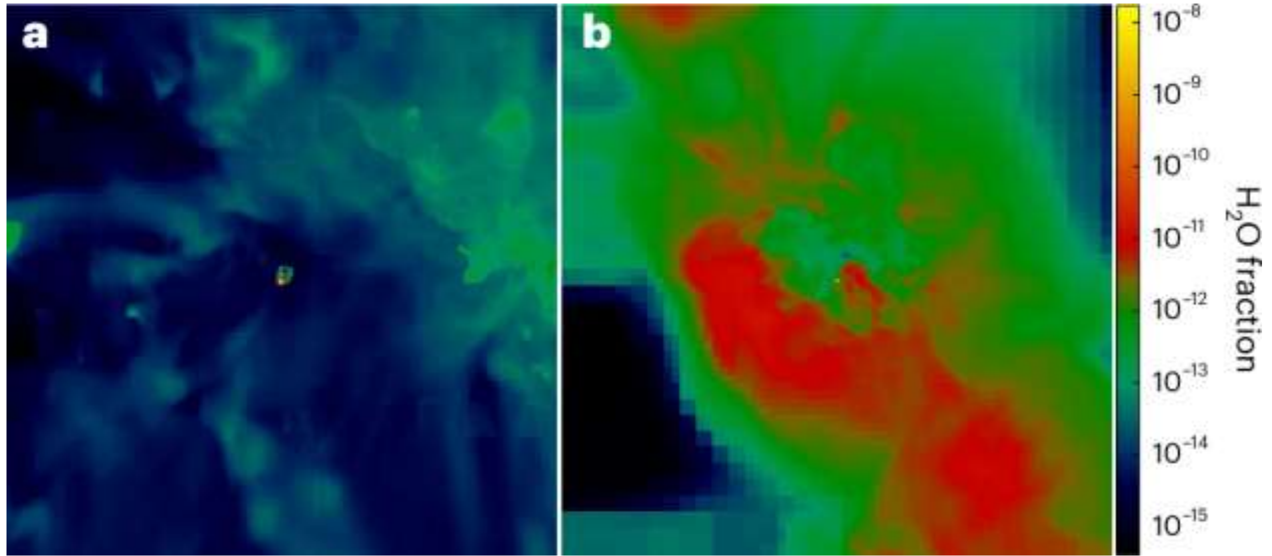



أ، ب: المستعر الأعظم CC13 $M_\odot$ في هالة كتلتها $1.1 \times 10^6$ كتلة شمسية بعد 1.2 مليون سنة من الانفجار (أ)، والمستعر الأعظم PI ذو الكتلة 200 $M_\odot$ في هالة كتلتها 2.2 $M_\odot$ $10^7 \times$ بعد 0.7 مليون سنة من الانفجار (ب) (يبلغ طول ضلع كل صورة 1 كيلوبارسيك kpc). تظهر مناطق الهيدروجين المتأين المتبقية من النجوم على شكل غاز تتراوح درجة حرارته بين 2000 و10000 كلفن، بينما تظهر مقذوفات CC وPI على شكل غاز مصدوم بدرجة حرارة $10^4$ و$10^5$ كلفن ونصف قطر يبلغ

[1] D. J. Whalen, M. A. Latif & C. Jessop, Abundant water from primordial supernovae at cosmic dawn, Nature (2025) Astronomy volume 9, pages741–746

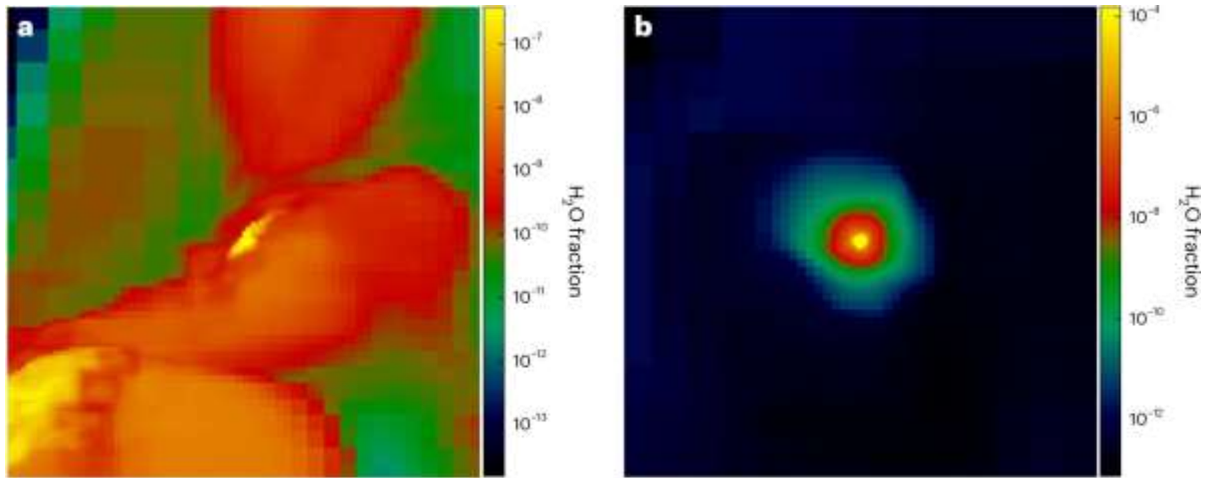
حوالي 50 و100 بارسيك على التوالي. في نهاية عمليات المحاكاة، لا تزال بقايا كلا المستعرين الأعظمين محصورة داخل مناطق الهيدروجين المتأين الخاصة بهما.

مع تمدد المستعرات العظمى وبرودتها، يتفاعل الأكسجين المنبعث من المقذوفات مع الهيدروجين (H) وجزيء الهيدروجين ($H_2$) لتكوين الماء في الهالة، كما يتكون جزيء الهيدروجين أيضًا على حبيبات الغبار. ينتشر بخار الماء لاحقًا في كلتا الهالتين بنسب كتلية تتراوح بين $10^{-14}$ و $10^{-12}$ في مستعر CC الأعظم، وبين $10^{-12}$ و$10^{-10}$ في مستعر PI الأعظم. على الرغم من تكوّن الماء في جميع أنحاء الهالتين، إلا أن كتلته الإجمالية تظل صغيرة وتنمو ببطء خلال معظم فترة المحاكاة. ويعود صغر الكتلة وبطء النمو إلى الكثافة المنخفضة نسبيًا في بقايا المستعر الأعظم المتمددة، حيث أنه تكون معدلات التفاعلات المنتجة للماء منخفضة. حيث أنه تزداد كتلة الماء من $10^{-8}$ to $10^{-7}\ M_\odot$ في المستعر الأعظم CC خلال أول 20 مليون سنة، ومن $1\ M_\odot\ 10^{-6}$ to $1.5 \times 10^{-6}$ في المستعر الأعظم PI خلال أول 2-3 ملايين سنة. وتكون نسب كتلة الماء في المستعر الأعظم PI على نطاق واسع أعلى ما يمكن في الغلاف الكثيف من الغاز الذي تجتاحه الصدمة المتوسعة وتخصبه كيميائياً، لأن الكثافة، وبالتالي معدلات تفاعل $H_2O$، تكون في أعلى مستوياتها هناك.




أ، ب: صور محاكاة لبخار الماء على مسافة 1 كيلوبارسيك في المستعر الأعظم CC ذي الكتلة $13M_\odot$ بعد 90 مليون سنة من الانفجار (أ)، والمستعر الأعظم PI ذي الكتلة $200\ M_\odot$ بعد 3 ملايين سنة من الانفجار (ب). تتراوح نسب كتلة بخار الماء المنتشر في الهالات من $10^{-14}$ إلى $10^{-12}$ في المستعر الأعظم CC، ومن $10^{-12}$ إلى $10^{-10}$ في المستعر الأعظم PI. تظهر تجمعات كثيفة ذات كتل مائية أعلى بكثير على شكل بقع صفراء في مركز كلتا الصورتين.

مع ذلك، ترتفع كتل الماء بشكل حادّ بعد ذلك بعدة مراتب في كلتا الهالتين، من 0 $M_\odot$ to $10^{-3}$ $M_\odot$ $^{-6}$عند 3 ملايين سنة في مستعر PI الأعظم، ومن 10 $M_\odot$ to $10^{-6}$ $M_\odot$ $^{-8}$من 30 إلى 90 مليون سنة في مستعر CC الأعظم. يتكوّن هذا الماء بالكامل تقريبًا في نواتين سحابيتين كثيفتين، واحدة في كل هالة، تلوثتا بالمعادن الناتجة عن الانفجارات ثم انهارتا إلى كثافات عالية ترتفع عندها معدلات تفاعل الماء فجأة. تصل نسب كتلة الماء إلى $10^{-4}$ في شظية المستعر الأعظم PI و$4 \times 10^{-7}$ في لب المستعر الأعظم CC بنهاية عمليات المحاكاة، وهو ما يتوافق مع تلك الموجودة في نماذج المنطقة الواحدة عند مستويات معدنية وكثافات مماثلة. وبالتالي، فإن المواقع الرئيسية لإنتاج الماء في المستعرات العظمى البدائية هي النوى الكثيفة ذاتية الجاذبية في المقذوفات، وليس الأحجام الكبيرة من الغاز المنتشر الغني بالماء في الهالة.




أ، ب: صور لنسبة كتلة الماء في نواة المستعر الأعظم CC عند 90 مليون سنة (أ) ونواة المستعر الأعظم PI عند 3 ملايين سنة (ب). يبلغ طول ضلع كل صورة 3.0 فرسخ فلكي (أ) و0.1 فرسخ فلكي (ب).

تشكلت نواة المستعر الأعظم CC قبل الانفجار، وتزداد ثراءً تدريجيًا بفعله. وقد أدى الاضطراب الناتج عن اندماج الهالتين عند الانزياح الأحمر $z = 26.4$، واللتين احتضنتا لاحقًا النجم الذي تبلغ كتلته $13M_\odot$ ، إلى تكوين عدة تجمعات غازية في جوارها قبل ولادتها. كانت إحدى هذه التجمعات على بُعد 30 فرسخًا فلكيًا فقط، وبعد أن نجت من التبخر الضوئي بفعل النجم، اصطدمت بمقذوفات الانفجار بعد 20 مليون سنة. كان الاضطراب في التجمع قبل الاصطدام فوق صوتي، بأرقام ماخ Mach تبلغ حوالي ~2، وهو أمر متوقع بالنسبة للنوى ذاتية الجاذبية في المراحل الأولى من الانهيار. مع ذلك، تصطدم تيارات المستعر الأعظم بالكتلة، مما يُحدث اضطرابًا فائق السرعة يُؤدي تدريجيًا إلى مزجها حتى تصل نسبة المعادن فيها إلى $Z \approx 10^{-4} Z_\odot$ (حيث

$Z_\odot$ هي نسبة المعادن في الشمس). تنهار الكتلة إلى نصف قطر يبلغ حوالي ~0.1pc فرسخ فلكي عند كتلة $1,627\ M_\odot$ ، وكثافة مركزية تبلغ $2.4\ \text{cm}^{-3} \times 10^{8}$ ، وكتلة إجمالية من الماء تبلغ $10^{-5}\ M_\odot$ بعد 90 مليون سنة من الانفجار.

يتشكل لب المستعر الأعظم PI نتيجة الانفجار. تعمل فقاعة المستعر الأعظم PI الساخنة على إثراء الغاز المحيط بها بسرعة إلى مستويات عالية (بل وفوق مستويات الطاقة الشمسية) من المعادن في المراحل المبكرة، كما هو الحال في المحاكاة الكونية السابقة. تُنتج الاضطرابات الهيدروديناميكية في الفقاعة المتمددة تقلبات في الكثافة المضطربة تُشكل كتلة غازية مضغوطة عند $Z = 0.04\ Z_\odot$. تنهار هذه الكتلة إلى نصف قطر يبلغ حوالي 0.01 pc فرسخ فلكي عند كتلة $35\ M_\odot$ ، وكثافة مركزية تبلغ $6.0\ \text{cm}^{-3} \times 10^{14}$ ، وكتلة إجمالية من الماء تبلغ $9\ M_\odot \times 10^{-3}$ مليون سنة بعد الانفجار. عند هذه الكثافات، يصبح تبريد الغبار مهمًا في اللب. تصبح هذه الكتلة ذاتية الجاذبية في أوقات أبكر بكثير مما هي عليه في المستعر الأعظم CC لأن ارتفاع نسبة المعادن فيها يؤدي إلى تبريد وانهيار أسرع. على النقيض من ذلك، ينهار لب سحابة المستعر الأعظم CC على فترات زمنية أطول بكثير نظرًا لانخفاض نسبة المعادن فيه، وذلك فقط بعد اختلاطه أولًا بالمعادن الخارجية بفعل الاضطراب فوق الصوتي. يتشكل لب المستعر الأعظم CC وينهار على فترات زمنية مماثلة لتلك التي تشكلت فيها نجوم الجيل الثاني بفعل المعادن في عمليات المحاكاة الكونية السابقة. أما لب المستعر الأعظم PI، فسيشكل هذه النجوم في وقت أبكر بكثير مما هو متوقع في أي محاكاة سابقة.

من المرجح أن تكون نوى السحب الغنية بالمعادن الناتجة عن انفجارات المستعرات العظمى من النوع الثالث هي المواقع الرئيسية لتكوّن الماء في معظم الهالات البدائية، إذ أن التشابه في ديناميكيات الانفجار كان سيؤدي إلى تكوين تجمعات كثيفة عبر نطاق واسع من الطاقات وكتل النجوم الأصلية وكتل الهالة. وبالتالي، فإن الظروف التي تُفضّل تكوّن هذه النوى، مثل عمليات الاندماج الكبيرة أو الانفجارات في مناطق الهيدروجين المتأين المحصورة، تُعظّم إنتاج الماء البدائي. تميل المستعرات العظمى في مناطق الهيدروجين المتأين المدمجة إلى تكوين تجمعات لأن عدم الاستقرار الديناميكي في المقذوفات المتمددة يتشكل مبكرًا، وتتوقف الصدمة في أوقات أبكر في الكثافات المحيطة الأعلى. مع ذلك، لا يزال بإمكان الانفجارات تكوين نوى كثيفة حتى لو اندفع تدفق الأشعة فوق البنفسجية المؤينة من النجم خارج الهالة، وفُقدت معظم الباريونات في تدفقات الشمبانيا، لأن التباينات في منطقة الهيدروجين المتأين لا تزال قادرة على حصر الإشعاع على طول بعض خطوط الرؤية.

تشير المحاكاة العددية الحديثة لتكوين الكواكب الخارجية، وصولًا إلى أدنى مستويات المعدنية التي تم تجربتها على الإطلاق، إلى أن كلا النواتين موقعان محتملان لتكوين الكواكب. قد يُنتج الغاز الموجود في كتلة المستعر الأعظم CC ذات الكتلة $Z = 10^{-4}\ Z_{\odot}$ أقراصًا كوكبية أولية تتفتت إلى كواكب بحجم المشتري. من حيث المبدأ، قد يؤدي المحتوى المعدني الأعلى لشظية المستعر الأعظم PI ذات الكتلة $Z = 0.04\ Z_{\odot}$ إلى تكوين كويكبات صخرية في أقراص كوكبية أولية مع نجوم منخفضة الكتلة. وتؤكد هذه النقطة الأخيرة حقيقة أن كتل جينز تنخفض إلى 1–2 $M_{\odot}$ في مركز نواة المستعر الأعظم PI. لا نتوقع أن يكون لهذه الكواكب تأثير كبير على التركيبة السكانية للكواكب الخارجية اليوم (باستثناء توسيع نطاقها ذي المحتوى المعدني المنخفض إلى قيم أصغر) لأن نجوم الجيل الثالث كانت قليلة نسبيًا عند الانزياح الأحمر $z \approx 15$–20، ولكن يمكن رصدها كعوالم منقرضة تدور حول نجوم قديمة فقيرة بالمعادن في مجرتنا خلال عمليات المسح المستقبلية للكواكب الخارجية.

تُظهر محاكاة Enzo التي أجريناها أن هذه الأقراص كانت غنيةً جدًا بالماء البدائي، بنسب كتلية أعلى بعشرة إلى ثلاثين ضعفًا من تلك الموجودة في السحب المنتشرة في مجرة درب التبانة في نواة المستعر الأعظم CC، وأقل ببضعة أضعاف فقط من تلك الموجودة في النظام الشمسي اليوم في نواة المستعر الأعظم PI. وتُشير النسب الكتلية العالية لجزيئات الماء ($H_2O$) وإمكانية تكوّن نجوم منخفضة الكتلة في نواة المستعر الأعظم PI إلى احتمال وجود منطقة صالحة للسكن في القرص الكوكبي الأولي، حيث تسمح درجات الحرارة المتوازنة بوجود الماء في الحالة السائلة. وإذا كان من الممكن أن تتشكل الكواكب الصغيرة عند $Z = 0.04\ Z_{\odot}$ في القرص، فإن الكواكب التي تنمو لتصبحها قد تحتوي على الماء.

تشير محاكياتنا إلى وجود الماء في المجرات البدائية نتيجة لتكوّنه المبكر في هالاتها المكونة لها. وقد تصل نسبة كتلة الماء في بقايا المستعرات العظمى المنتشرة التي استوعبتها هذه المجرات إلى $10^{-10}$، أي أقل بعشر مرات فقط مما هي عليه في مجرتنا درب التبانة اليوم. وقد تفكك جزء من هذا الماء ضوئيًا بفعل النجوم الضخمة ذات المحتوى المعدني المنخفض في هذه المجرات، أو دُمر بفعل تفاعلات كيميائية أخرى عندما بلغت مستويات أعلى من المحتوى المعدني في مراحل لاحقة. ومع ذلك، فإن ازدياد نسبة الغبار في المجرات المبكرة كان من شأنه أن يحمي الماء من الأشعة فوق البنفسجية ويخفف من تدميره إلى حد ما. ولا يزال تحديد كمية الماء التي نجت من بيئات الإشعاع القاسية في المجرات الأولى أمرًا قيد البحث.

## الماء في منطقة تكوين الكواكب الأرضية في قرص PDS 70

من المتوقع أن تتشكل الكواكب الأرضية والكواكب التي تدور حولها كواكب أصغر من نبتون في المناطق الداخلية (أقل من 10 وحدات فلكية) للأقراص الكوكبية الأولية. يلعب الماء دورًا محوريًا في تكوينها، على الرغم من أنه لم يتضح بعد ما إذا كانت جزيئات الماء تتشكل في الموقع نفسه أم تُنقل من القرص الخارجي. حتى الآن، لم تُقدم رصدات تلسكوب سبيتزر الفضائي سوى حدود عليا لسطوع الماء في الأقراص الداخلية الفقيرة بالغبار، على غرار نظام PDS 70، وهو أول نظام تم تأكيد وجود كوكب أولي فيه بشكل مباشر. نقدم هنا نتائج رصد تلسكوب جيمس ويب الفضائي لنظام PDS 70، وهو هدف مرجعي للبحث عن الماء في قرص يحتوي على فجوة كبيرة (حوالي 54 وحدة فلكية) نحتتها الكواكب[1]، تفصل بين قرص داخلي وآخر خارجي. تُظهر نتائجنا وجود الماء في القرص الداخلي لنظام PDS 70. وهذا يعني أن الكواكب الأرضية المحتملة التي تتشكل فيه لديها إمكانية الوصول إلى مخزون من الماء. تشير كثافة عمود بخار الماء إلى تكوّنه في الموقع عبر سلسلة تفاعلات تشمل الأكسجين والهيدروجين و/أو الهيدروكسيل، وبقائه بفضل الحماية الذاتية للماء. يدعم هذا أيضًا وجود انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وهو جزيء آخر حساس للتفكك الضوئي بالأشعة فوق البنفسجية. قد تلعب الحماية بالغبار، وتجديد كل من الغاز والغبار الدقيق من القرص الخارجي، دورًا في استدامة مخزون الماء. تكشف ملاحظاتنا أيضًا عن تباين كبير في توزيع الطاقة الطيفية للأشعة تحت الحمراء المتوسطة، مما يشير إلى تغير في هندسة القرص الداخلي.

رصدت عمليات الرصد بواسطة جهاز Spitzer-IRS وجود الماء في حوالي 50% من الأقراص الداخلية الغنية بالغبار حول نجوم تي تاوري، لكنها لم تحصل إلا على حدود عليا للأقراص ذات الفجوات أو التجاويف الكبيرة في الغبار الداخلي، والتي تُحدد بواسطة مؤشر طيفي للأشعة تحت الحمراء المتوسطة $n_{13-30} > 0.9$، حيث n هو ميل الطيف بين 13 و30 ميكرومتر. يُظهر رصد بخار الماء في طيف PDS 70 MIRI أن PDS 70 قد حافظ إلى حد ما على الظروف الفيزيائية والكيميائية للأقراص الداخلية الغنية بالغبار في منطقة تكوين الكواكب الأرضية، على الرغم من وجود فجوة كبيرة ملحوظة (انظر "أصل الماء في PDS 70" في قسم الطرق). يوفر

[1] G. Perotti, V. Christiaens, Th. Henning, B. Tabone, L. B. F. M. Waters, I. Kamp, G. Olofsson, S. L. Grant, D. Gasman, J. Bouwman, M. Samland, R. Franceschi, E. F. van Dishoeck, K. Schwarz, M. Güdel, P.-O. Lagage, T. P. Ray, B. Vandenbussche, A. Abergel, O. Absil, A. M. Arabhavi, I. Argyriou, D. Barrado, A. Boccaletti, …G. Wright, Water in the terrestrial planet-forming zone of the PDS 70 disk, Nature volume 620, pages 516–520 (2023)

نموذجنا للطبقة المتوازنة حراريًا (LTE) تحليلًا كميًا أوليًا فقط لانبعاث $H_2O$. قد تؤدي تأثيرات عدم التوازن الحراري (Non-LTE) إلى انبعاث خطوط دون حرارية، مما يجعل مساحة الانبعاث المقدرة لدينا حدًا أدنى. في أقراص تي تاوري ذات التدرجات الحرارية الشعاعية القوية، يُتوقع أن تنشأ خطوط الماء من مناطق مختلفة من القرص، وذلك تبعًا لمستوى طاقتها العليا ومعاملات أينشتاين-أ. يتطلب الأمر في المستقبل نمذجةً تفصيليةً باستخدام بنية قرص واقعية، مع تضمين تأثيرات عدم التوازن الحراري المحلي، مثل الضخ الإشعاعي بالأشعة تحت الحمراء، لزيادة دقة تحديد توزيع الماء ($H_2O$) عبر القرص الداخلي. مع ذلك، يُثبت هذا التحليل الأولي أن القرص الداخلي لـ PDS 70 غني بالماء، وأن معلمات نموذج الشريحة المُستنتجة تتوافق تقريبًا مع نموذج كيميائي حراري مُفصّل. عند الكثافات النموذجية لمناطق القرص الداخلي ($n_H \geq 10^8$ $cm^{-3}$)، يمكن أن تصل التفاعلات الكيميائية بسرعة إلى حالة الاستقرار، ويتشكل بخار الماء من سلسلة تفاعلات بسيطة تشمل الأكسجين والهيدروجين والهيدروكسيل. يمتص الماء والهيدروكسيل الأشعة فوق البنفسجية بكفاءة (أي، يوفر الماء والهيدروكسيل حمايةً)، مما يضمن بقاء جزيئات الماء حتى في المناطق ذات الكثافة المنخفضة للغبار. هذه الآلية وحدها قادرة على تفسير كثافات عمود بخار الماء المكتشفة في هذه الدراسة، ويدعمها وجود انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. توفر الحبيبات الصغيرة في القرص الداخلي حمايةً إضافية من الأشعة فوق البنفسجية.
أحد الأسئلة التي تتبادر إلى الذهن هو ما إذا كان بخار الماء في PDS 70 قد نشأ قبل تشكل الكواكب الأولية العملاقة داخل الفجوة، أو ما إذا كان هناك إمداد مستمر من الغاز من مناطق القرص الخارجي إلى مناطق القرص الداخلي. تكشف عمليات رصد أول أكسيد الكربون عالية الدقة المكانية التي أجراها مرصد ألما عن وجود غاز داخل الفجوة. تشير الملاحظات والنماذج إلى أن الفجوة تعاني من نقص في الغاز (بمقدار يتراوح بين رتبتين وثلاث رتب بافتراض توزيع كثافة سطحية r−1) ونقص في الغبار، لكنها ليست خالية تمامًا. أحد الاحتمالات هو قدرة مجموعة من جزيئات الغبار الحاملة للماء على التسلل عبر مداري PDS 70 b و PDS 70 c، مما يُثري مخزون القرص الداخلي. تشير الأدلة التجريبية إلى إمكانية حفظ الماء المرتبط كيميائيًا بالسيليكات المعقدة عند درجات حرارة تصل إلى 400-500 كلفن، وبالتالي بقائه في المناطق التي رصدناها داخل خط تجمد الماء. نلاحظ أنه من المتوقع حدوث ترشيح جزئي للغبار مع تجدد الغاز، حيث يمكن لجزيئات الغبار الصغيرة أن تتفاعل مع الغاز. لذلك، من الممكن تجدد كل من الغاز والغبار من القرص الخارجي للحفاظ على مخزون الماء، وبالتالي معدل تراكم PDS 70.

## اكتشاف المياه في منطقة تكوين الكواكب الصخرية

فى تقرير من معهد Max Planck Institute for Astronomy كشفت عمليات الرصد التي أجراها جهاز MIRI (جهاز الأشعة تحت الحمراء المتوسطة) على متن تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST) عن وجود الماء بالقرب من مركز القرص، بالقرب من النجم المضيف PDS 70. في النظام الشمسي[1]، تُعد هذه المنطقة هي التي تدور فيها الكواكب الصخرية حول الشمس. ووفقًا للتحليل، يوجد الماء على شكل بخار ساخن، متوهجًا عند درجة حرارة تقارب 330 درجة مئوية (600 كلفن).

يُشير توماس هينينغ، مدير معهد ماكس بلانك لعلم الفلك والفيزياء الفلكية، إلى أن "هذا الاكتشاف مثير للغاية، إذ يُسهم في استكشاف المنطقة التي تتشكل فيها الكواكب الصخرية الشبيهة بالأرض عادةً". وهي مؤلفة مشاركة في المقالة الأصلية، والباحثة الرئيسية المشاركة في مشروع MIRI، والباحثة الرئيسية في برنامج MINDS (مسح أقراص الأشعة تحت الحمراء المتوسطة بواسطة MIRI). يُعدّ MINDS برنامجًا مضمونًا زمنيًا لتلسكوب جيمس ويب الفضائي، ويضم معاهد بحثية من 11 دولة أوروبية. ويهدف هذا المسح إلى تحديد خصائص الأقراص المكونة من الغاز والغبار حول النجوم الفتية، مما يُمكننا من فهم الظروف التي تُحدد تكوين الكواكب التي يُحتمل تشكلها هناك.

يُعدّ PDS 70 أول قرص نجمي قديم نسبيًا - يبلغ عمره حوالي 5.4 مليون سنة - حيث عثر الفلكيون على الماء. مع مرور الوقت، يتناقص محتوى الغاز والغبار في الأقراص التي تتشكل فيها الكواكب. إما أن إشعاع النجم المركزي أو الرياح النجمية يزيلان موادًا مثل الغبار والغاز، أو أن الغبار ينمو ليصبح أجسامًا أكبر تُشكّل في النهاية كواكب. ولأن الدراسات السابقة فشلت في رصد الماء في المناطق المركزية لأقراص مماثلة في تطورها، فقد اشتبه الفلكيون في أنه قد لا ينجو من الإشعاع النجمي القاسي، مما يؤدي إلى بيئات صخرية جافة لتكوين الكواكب.

كان رصد نظام PDS 70 باستخدام جهاز MIRI على متن تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST) مفتاحًا لتحدي تلك الفرضية. MIRI هو جهاز علمي متعدد الأغراض يعمل بالأشعة تحت الحمراء بأطوال موجية تتراوح بين 5 و28 ميكرونًا، وقد صممه اتحاد أوروبي من المؤسسات البحثية. يجمع الجهاز بين كاميرا تصوير ومطياف.

---

[1] ) https://www.mpg.de/20541783/water-rocky-planets

وبدعم من شركاء صناعيين، وفر معهد ماكس بلانك لعلم الفلك (MPIA) آليات جميع عناصر التحكم في نطاق الطول الموجي، مثل المرشحات وعجلات المحزز، وقاد التصميم الكهربائي. تُظهر عمليات الرصد باستخدام MIRI أن المحيطات الداخلية للأقراص المتطورة والمنضبة من الغبار قد لا تكون جافة كما يُشاع. إذا كان الأمر كذلك، فقد تولد العديد من الكواكب الأرضية التي تتشكل في تلك المناطق بمكون أساسي لاستدامة الحياة.

مع ذلك، لم يعثر العلماء حتى الآن على أي كواكب بالقرب من مركز قرص PDS 70. وبدلاً من ذلك، رصد الفلكيون كوكبين عملاقين غازيين أبعد من ذلك، هما PDS 70 b و c. وقد تراكمت عليهما كميات من الغبار والغاز أثناء دورانهما حول نجمهما المضيف خلال فترة نموهما، مما أدى إلى تكوين فجوة حلقية واسعة تكاد تخلو من أي مادة قابلة للكشف.

مع ذلك، فإن أي كواكب صخرية تتشكل في بيئة غنية بالماء بالقرب من النجم ستستفيد من إمداد مائي في بداية دورة حياتها. لذا، فبالإضافة إلى الماء الذي ينتقل إلى الكواكب الصخرية الجافة في البداية عبر عملية طويلة تشمل الكويكبات كنظام نقل كوني عشوائي إلى حد ما، تفتح هذه النتيجة الجديدة الباب أمام آلية مستدامة محتملة توفر الماء للكواكب منذ نشأتها.

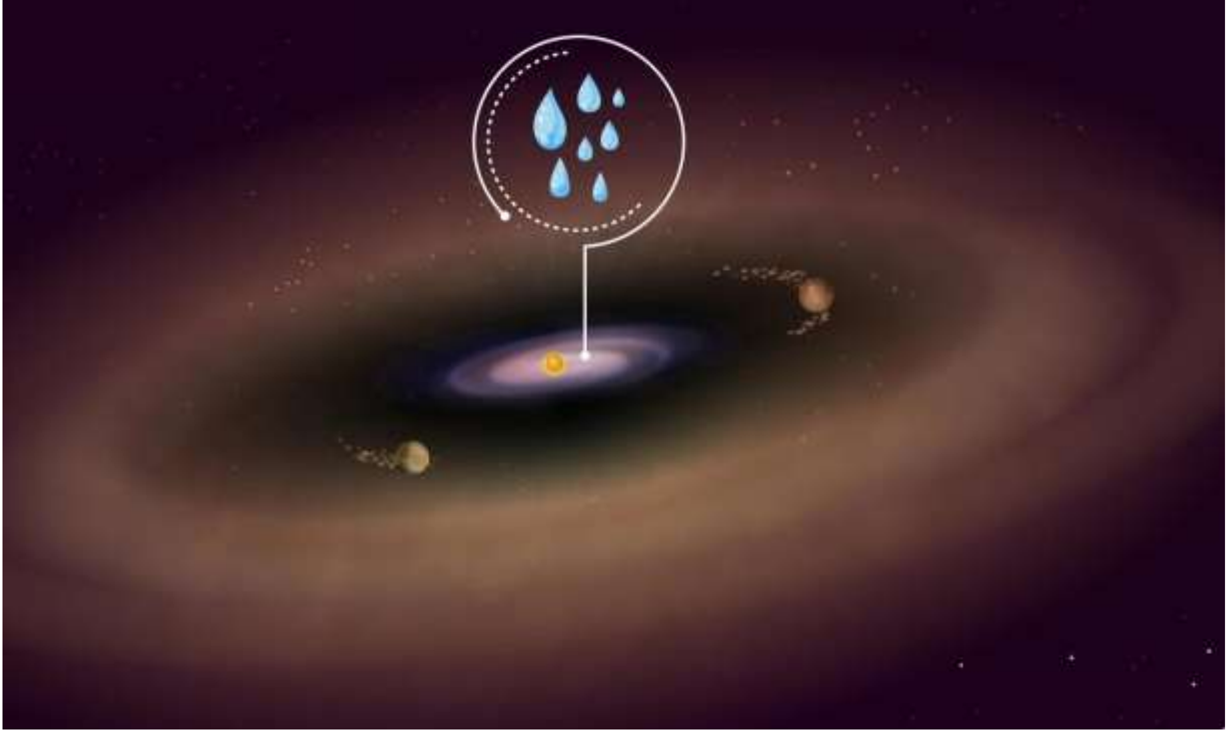
نظرًا لأن وجود الماء كان غير متوقع إلى حد ما، فإن فريق MINDS يُجري دراسة لعدة سيناريوهات لتفسير هذا الاكتشاف. أحد الاحتمالات هو أن يكون الماء بقايا من سديم غني بالماء كان موجودًا في البداية قبل مرحلة القرص. الماء شائع نسبيًا، لا سيما في حالته المتجمدة، حيث يُغطي جزيئات الغبار الدقيقة. عند تعرضه للحرارة بالقرب من نجم ناشئ، يتبخر الماء ويختلط بالغازات الأخرى. لسوء الحظ، جزيئات الماء هشة للغاية وتتفكك إلى مكونات أصغر مثل الهيدروجين والأكسجين عند تعرضها للأشعة فوق البنفسجية الضارة من النجم القريب. مع ذلك، تعمل المواد المحيطة، مثل الغبار وجزيئات الماء نفسها، كدرع واقٍ. ونتيجة لذلك، من المحتمل أن يكون جزء من الماء المكتشف بالقرب من PDS 70 قد نجا من التدمير.

قد يكون مصدر آخر هو الغاز المتسرب من الحواف الخارجية لقرص PDS 70. في ظروف معينة، قد يتحد غازا الأكسجين والهيدروجين لتكوين بخار الماء. إضافةً إلى ذلك، قد يسحب تيار الغاز المتحرك جزيئات الغبار الغنية بالماء المهاجرة من حلقة الغبار الخارجية البارزة. النجم المركزي خافتٌ للغاية لدرجة أنه لا يستطيع تبخير جليد الماء على مسافة تلك الحلقة. فقط عندما تدخل حبيبات الغبار إلى القرص الداخلي بالقرب من

النجم، يتحول الجليد إلى غاز. يقول بيروتي: "ربما يكمن السر في مزيج من كل هذه الاحتمالات. مع ذلك، من المرجح أن تلعب آلية واحدة دورًا حاسمًا في الحفاظ على مخزون الماء في قرص PDS 70. المهمة المستقبلية هي تحديد هذه الآلية."

نظرًا لأن وجود الماء كان غير متوقع إلى حد ما، فإن فريق MINDS يُجري دراسة لعدة سيناريوهات لتفسير هذا الاكتشاف. أحد الاحتمالات هو أن يكون الماء بقايا من سديم غني بالماء كان موجودًا في البداية قبل مرحلة القرص. الماء شائع نسبيًا، لا سيما في حالته المتجمدة، حيث يُغطي جزيئات الغبار الدقيقة. عند تعرضه للحرارة بالقرب من نجم ناشئ، يتبخر الماء ويختلط بالغازات الأخرى. لسوء الحظ، جزيئات الماء هشة للغاية وتتفكك إلى مكونات أصغر مثل الهيدروجين والأكسجين عند تعرضها للأشعة فوق البنفسجية الضارة من النجم القريب. مع ذلك، تعمل المواد المحيطة، مثل الغبار وجزيئات الماء نفسها، كدرع واقٍ. ونتيجة لذلك، من المحتمل أن يكون جزء من الماء المكتشف بالقرب من PDS 70 قد نجا من التدمير.

قد يكون مصدر آخر هو الغاز المتسرب من الحواف الخارجية لقرص PDS 70. في ظروف معينة، قد يتحد غازا الأكسجين والهيدروجين لتكوين بخار الماء. إضافةً إلى ذلك، قد يسحب تيار الغاز المتحرك جزيئات الغبار الغنية بالماء المهاجرة من حلقة الغبار الخارجية البارزة. النجم المركزي خافتٌ للغاية لدرجة أنه لا يستطيع تبخير جليد الماء على مسافة تلك الحلقة. فقط عندما تدخل حبيبات الغبار إلى القرص الداخلي بالقرب من النجم، يتحول الجليد إلى غاز. يقول بيروتي: "ربما يكمن السر في مزيج من كل هذه الاحتمالات. مع ذلك، من المرجح أن تلعب آلية واحدة دورًا حاسمًا في الحفاظ على مخزون الماء في قرص PDS 70. المهمة المستقبلية هي تحديد هذه الآلية."



باستخدام تلسكوب جيمس ويب الفضائي، اكتشف فريق بحث MINDS بقيادة معهد ماكس بلانك لعلم الفلك وجود الماء في المنطقة الداخلية لقرص من الغاز والغبار يحيط بالنجم الفتيّ PDS 70. ويتوقع علماء الفلك تشكّل كواكب أرضية في تلك المنطقة. يُعدّ هذا أول اكتشاف من نوعه في قرص يحتوي على كوكبين على الأقل. ستستفيد أي كواكب صخرية تتشكّل في القرص الداخلي من وجود مخزون مائي محلي كبير، مما يُحسّن فرص سكنها لاحقًا. يُقدّم هذا الاكتشاف دليلًا على وجود آلية لتزويد الكواكب التي يُحتمل أن تكون صالحة للسكن بالماء أثناء تشكّلها، بالإضافة إلى تأثيرات لاحقة من الكويكبات الحاملة للماء. تصور فني لقرص PDS 70. رصد تلسكوب جيمس ويب الفضائي وجود الماء في القرص الداخلي، حيث تتشكل الكواكب الأرضية عادةً. وقد نحت كوكبان عملاقان غازيان فجوة واسعة في القرص المكون من الغاز والغبار أثناء نموهما.

## النظام الشمسي وما وراءه غارق في الماء

بينما تستكشف بعثات ناسا نظامنا الشمسي[1] وتبحث عن عوالم جديدة، تجد الماء في أماكن غير متوقعة. يُعدّ الماء جزءًا من رحلتنا للبحث عن كواكب صالحة للسكن وحياة خارج كوكب الأرض، ولكنه يربط بين عوالم تبدو غير مترابطة بطرق مدهشة.

وقالت إيلين ستوفان، كبيرة علماء ناسا: "قدّمت أنشطة ناسا العلمية في السنوات الأخيرة سلسلة من الاكتشافات المذهلة المتعلقة بالماء، والتي تُلهمنا لمواصلة البحث في أصولنا والإمكانيات الرائعة لعوالم أخرى، وحياة، في الكون. قد نتمكن في حياتنا من الإجابة أخيرًا على سؤال ما إذا كنا وحدنا في النظام الشمسي وما وراءه".

يُعدّ الهيدروجين والأكسجين، وهما العنصران الكيميائيان المكونان للماء، من أكثر العناصر وفرة في الكون. ويرى علماء الفلك بصمات الماء في السحب الجزيئية العملاقة بين النجوم، وفي أقراص المواد التي تُمثّل أنظمة كوكبية ناشئة، وفي أغلفة الكواكب العملاقة التي تدور حول نجوم أخرى. يُعتقد أن هناك عوالم عديدة تحتوي على ماء سائل تحت سطحها، والعديد منها يحتوي على الماء في صورة جليد أو بخار. يوجد الماء في الأجرام السماوية البدائية كالمذنبات والكويكبات، وفي الكواكب القزمة مثل سيريس. ويُعتقد أن أغلفة الكواكب العملاقة الأربعة - المشتري وزحل وأورانوس ونبتون - وباطنها تحتوي على كميات هائلة من الماء، كما أن أقمارها وحلقاتها تحوي كميات كبيرة من الجليد المائي.

ولعلّ أكثر العوالم المائية إثارة للدهشة هي الأقمار الجليدية الخمسة التابعة للمشتري وزحل، والتي تُظهر أدلة قوية على وجود محيطات تحت سطحها: غانيميدGanymede ، وأوروبا Europa، وكاليستو Callisto التابعة للمشتري، وإنسيلادوس Enceladus، وتيتان Titan التابعة لزحل. وقد قدّم علماء، باستخدام تلسكوب هابل Hubble الفضائي التابع لناسا، مؤخرًا أدلة قوية على أن غانيميد يحتوي على محيط مالح تحت سطحه، يُرجّح أنه محصور بين طبقتين من الجليد.

---

[1] ) Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 7 April 2015
https://www.jpl.nasa.gov/news/the-solar-system-and-beyond-is-awash-in-water/

يُعتقد أن أوروبا وإنسيلادوس يضمان محيطًا من الماء السائل تحت سطحهما، متصلًا بصخور غنية بالمعادن، وقد يحتويان على العناصر الثلاثة اللازمة للحياة كما نعرفها: الماء السائل، والعناصر الكيميائية الأساسية للعمليات البيولوجية، ومصادر الطاقة التي يمكن للكائنات الحية استخدامها. وقد كشفت مهمة كاسيني التابعة لناسا أن إنسيلادوس عالم نشط مليء بالينابيع الجليدية. وتشير الأبحاث الحديثة إلى احتمال وجود نشاط حراري مائي في قاع محيطه، وهي بيئة قد تكون مناسبة للكائنات الحية. كما عثرت مركبات ناسا الفضائية على دلائل على وجود الماء في فوهات مظللة بشكل دائم على عطارد وقمرنا، والتي تحمل سجلًا لآثار اصطدامات جليدية عبر العصور، وكأنها آثار محفوظة في درجات حرارة منخفضة للغاية.

وبينما يبدو نظامنا الشمسي غارقًا في بعض الأماكن، يبدو أن أماكن أخرى قد فقدت كميات كبيرة من الماء.

وعلى سطح المريخ، عثرت مركبات ناسا الفضائية على أدلة واضحة على أن الكوكب الأحمر كان يحتوي على الماء على سطحه لفترات طويلة في الماضي البعيد. فقد اكتشف مسبار كيوريوسيتي التابع لناسا مجرى مائيًا قديمًا كان موجودًا في ظروف مواتية للحياة كما نعرفها.

في الآونة الأخيرة، تمكن علماء ناسا، باستخدام تلسكوبات أرضية، من تقدير كمية المياه التي فقدها المريخ عبر العصور. وخلصوا إلى أن الكوكب كان يحتوي في الماضي على كمية كافية من الماء السائل لتكوين محيط يغطي ما يقارب نصف الكرة الشمالي للمريخ، حيث وصل عمقه في بعض المناطق إلى أكثر من 1.6 كيلومتر. ولكن أين ذهبت هذه المياه؟

من الواضح أن جزءًا منها موجود في القمم الجليدية القطبية للمريخ وتحت سطحه. ونعتقد أيضًا أن جزءًا كبيرًا من الغلاف الجوي المبكر للمريخ قد جُرِّد بفعل رياح الجسيمات المشحونة القادمة من الشمس، مما أدى إلى جفاف الكوكب. وتعمل مهمة مافن التابعة لناسا جاهدةً على تتبع هذه المعلومات من مدارها حول المريخ. ترتبط قصة جفاف المريخ ارتباطًا وثيقًا بكيفية تفاعل غلافه الجوي مع الرياح الشمسية. وتُعد البيانات المستقاة من مهمات ناسا الشمسية - بما في ذلك مرصد ستيريو، ومرصد ديناميكيات الشمس، ومسبار سولار بروب بلس المخطط له - بالغة الأهمية لمساعدتنا على فهم ما حدث بشكل أفضل.

يُقدّم فهم توزيع الماء في نظامنا الشمسي معلومات قيّمة حول كيفية تشكّل الكواكب والأقمار والمذنبات والأجرام الأخرى قبل 4.5 مليار سنة من قرص الغاز والغبار الذي كان يُحيط بشمسنا. كان الفضاء الأقرب إلى

الشمس أكثر حرارة وجفافًا من الفضاء الأبعد عنها، والذي كان باردًا بما يكفي لتكثّف الماء. يقع خط الفصل، المسمى "خط الصقيع"، حول مدار كوكب المشتري الحالي. وحتى اليوم، تُعدّ هذه المسافة التقريبية من الشمس هي التي يبدأ عندها الجليد على معظم المذنبات بالذوبان ويصبح "نشطًا". يُطلق رذاذها اللامع جليد الماء وبخاره وغباره ومواد كيميائية أخرى، يُعتقد أنها تُشكّل الأساس الصخري لمعظم عوالم النظام الشمسي الخارجي البارد.

يعتقد العلماء أن الحرارة كانت شديدة في بدايات النظام الشمسي بحيث لم يكن من الممكن تكثّف الماء إلى سائل أو جليد على الكواكب الداخلية، لذا كان لا بدّ من نقله - ربما عن طريق المذنبات والكويكبات الحاملة للماء. تدرس مهمة "دون" التابعة لناسا حاليًا سيريس، وهو أكبر جرم في حزام الكويكبات بين المريخ والمشتري. ويعتقد الباحثون أن سيريس قد يمتلك تركيبة غنية بالماء، مشابهة لبعض الأجرام التي جلبت الماء إلى الكواكب الصخرية الداخلية الثلاثة، بما فيها الأرض.

وبالنظر إلى أبعد من ذلك، فإن مراقبة الأنظمة الكوكبية الأخرى أثناء تشكلها تُشبه إلقاء نظرة خاطفة على صور نظامنا الشمسي في مراحله الأولى، ويُعدّ الماء جزءًا أساسيًا من هذه القصة. فعلى سبيل المثال، رصد تلسكوب سبيتزر الفضائي التابع لناسا علامات على هطول وابل من المذنبات الغنية بالماء على نظام شمسي شاب، يشبه إلى حد كبير القصف الذي تعرضت له الكواكب في نظامنا الشمسي في شبابها.

**تحيط بالنظام الشمسي هالة من الغبار والحطام، تتكون في معظمها من جليد الماء. هل يمكن أن تكون هذه هي "المياه العلوية" المذكورة في سفر التكوين 7:1؟**

تُعتبر أقراص الغاز والغبار والحطام التي رُصدت مؤخرًا باستخدام أجهزة الأشعة تحت الحمراء الحديثة وأجهزة الموجات المليمترية في الأنظمة النجمية القريبة بمثابة مؤشرات على وجود أجسام كبيرة تصطدم ببعضها. تُشكل هذه الملاحظات إشكالية لنظرية السدم التطورية لتكوين الأنظمة الكوكبية، ولكن يُمكن تفسيرها بسهولة من منظور الخلق. أقترح أن هذه الأجسام المُحدثة للفوهات تُشابه "المياه التي في السماء"، والتي استخدمها الله جزئيًا خلال اللعنة والطوفان. وفقًا لهذا الرأي، تُمثل "المياه التي في السماء" جميع الأجسام، الكبيرة والصغيرة، التي كانت تقع وراء نبتون في نظامنا الشمسي، بما في ذلك جميع المواد المذنبة، المُكوّنة في الغالب من جليد الماء. يبلغ إجمالي كميتها اليوم حوالي 0.43 كتلة أرضية، ولكن قبل اللعنة، ربما كانت أكبر بمئة ضعف. تركت بعض هذه الأجسام الكبيرة آثارها على سطح الأرض على شكل فوهات صدمية، كما تُرى اليوم من الفضاء. بل ربما يكون بعضها قد تسبب في الطوفان. يكشف التحليل الطيفي لجسم حزام كايبر (KBO) كواوار أن سطحه يتكون من جليد مائي بلوري وهيدرات الأمونيا (NH3.H2O). كان من المفترض أن يتلاشى كلاهما بفعل إشعاع الجسيمات عالية الطاقة على مدى 107 سنوات، لذا فإن وجودهما دليل على حداثة النظام الشمسي، ويعارض فرضية عمر النظام الشمسي البالغ 5 مليارات سنة. علاوة على ذلك، فإن طيف كواوار، في نطاق 1 إلى 2.5 ميكرومتر، مشابه جدًا لطيف شارون، قمر بلوتو، الذي يُشتبه منذ فترة طويلة في أنه جسم من حزام كايبر تم أسره. وهكذا، تتزايد الأدلة على أن هذه الأجسام قد تكون بقايا هالة مائية، كما هو الحال في "المياه العلوية".

في ورقة بحثية سابقة، اقترح الباحثون أن "المياه العلوية" تُحيط بالنظام الشمسي في هالة[1]، مُحتجزة على شكل جليد متجمد، ومذنبات ملوثة، وكتل ضخمة أخرى من المواد المتجمدة. وقد شكّل هذا جزءًا من نموذج النظام الشمسي الفتيّ. من الواضح، استنادًا إلى سفر التكوين 1:2 ورسالة بطرس الثانية 3:5، أن الأرض و"المياه العلوية" قد تشكلتا من الماء. ويُرجّح أن غالبية مياه طوفان نوح قد أتت من المياه الموجودة على سطح الأرض وداخلها، نظرًا لأهميتها في سفر التكوين 7:11. ومن المحتمل أيضًا أن تكون المياه العلوية، على شكل مذنبات

[1] Hartnett, J.G., Look-back time in our galactic neighbourhood leads to a new cosmogony, Journal of Creation 17(1):73–79, 2003

جليدية، جزءًا من "نوافذ السماء"، وربما كانت سببًا في حدوث الطوفان. وتشير فوهات الاصطدام العديدة على الأرض والقمر والكواكب الأخرى إلى فترة من القصف الكوني، كما يُشير موقعها في السجل الرسوبي إلى حدوث ذلك أثناء الطوفان. ربما حدث قصف كوني أيضًا عندما لعن الله الكون، فتغير نظام الأشياء برمته. وقد أشرتُ كذلك إلى أن هذه الأجرام قد تلعب دورًا محوريًا في عقاب الكافرين يوم القيامة. في هذه الورقة، أتناول بالبحث الموقع والحجم والتركيب المحتملين لهذه الهالة. سأدرسها من حيث حالتها الراهنة، فضلًا عن حجمها قبل اللعنة والطوفان. كما أقدم أدلة حديثة تشير إلى أن الأجرام المصنفة كأجرام حزام كايبر في علم الفلك العلماني هي بقايا تلك الهالة.

من خلال دراسة أنظمة نجمية أخرى، تمكن علماء الفلك من تحليل حجم وامتداد أقراص الغبار والحطام المحيطة بالنجوم الأم. وقد رُصدت أقراص الحطام الباردة والغبارية حول نجوم التسلسل الرئيسي باستخدام تلسكوبات متخصصة، قادرة على الرؤية بأطوال موجية في نطاقي الأشعة تحت الحمراء القريبة والموجات دون المليمترية. وتعتمد هذه التقنية على حقيقة أن جزيئات الغبار تُضاء بإشعاع النجم الأم، ثم تُعيد إشعاعها (كأجسام سوداء) بأطوال موجية مناسبة.

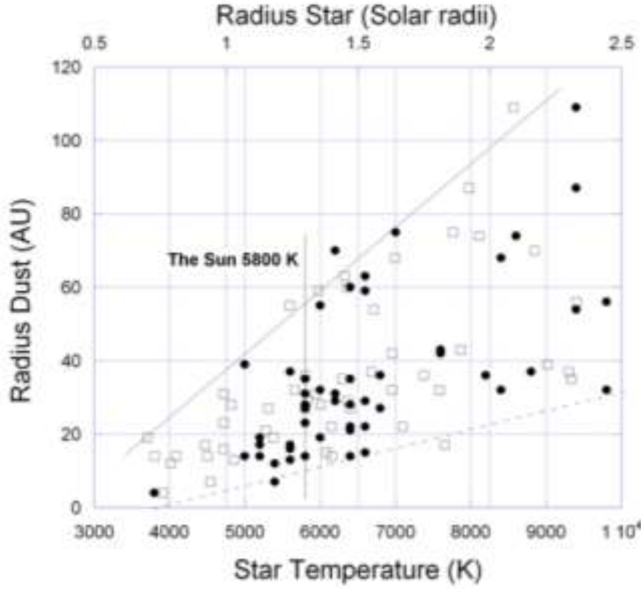
تخترق هذه الانبعاثات، إلى حد ما، سحب الغبار، وتُرصد بواسطة أجهزة على تلسكوبات أرضية (مثل كاميرا مصفوفة مقياس الإشعاع الحراري دون المليمترية المشتركة (SCUBA) في تلسكوب جيمس كلارك ماكسويل في مونا كيا، هاواي) وفي مدارات على متن قمري IRAS (قمر علم الفلك بالأشعة تحت الحمراء[1]) وISO (مرصد الفضاء بالأشعة تحت الحمراء[2]).

تم رصد عشرات النجوم من هذا النوع ضمن نطاق 60 فرسخًا فلكيًا تقريبًا. يتميز العديد منها ببنية غير متناظرة محوريًا، مما يشير إلى وجود كوكب في منطقة القرص النجمي. كما رصد القمر الصناعي COBE تجمعات من الغبار تسبق الأرض وتتبعها في مدارها حول الشمس بطريقة مماثلة. في كثير من هذه الحالات، حيث يُشتبه بوجود كوكب، تكون المسافة إلى الكوكب المحتمل من نفس رتبة المسافة إلى نبتون في نظامنا الشمسي (حوالي 30 وحدة فلكية و5 ثوانٍ قوسية).

[1] https://www.iras.ucalgary.ca/iras.html , 23 May 2005 (

[2] https://www.iras.ucalgary.ca/iso.html , 23 May 2005 (

يُقدّم زوكرمان وسونغ كمًّا هائلًا من البيانات للعديد من الأنظمة النجمية التي تحتوي على سحب غبارية[1]. وقد قمتُ بإعادة إنتاج هذه البيانات برسم أنصاف أقطار المدارات المميزة للسحب الغبارية (Rdust) كدالة لدرجة حرارة النجم (Tstar) ونصف قطره (Rstar). حُسب نصف قطر السحابة الغبارية من النموذج = Rdust (Rstar/2)(Tstar/Tdust))، حيث تم قياس Rstar وTstar وTdust. يُظهر حجم السحابة الغبارية اتجاهًا واضحًا كدالة لدرجة حرارة النجم أو نصف قطره. تُشير الخطوط المتصلة إلى درجة حرارة شمسنا (5800 كلفن).

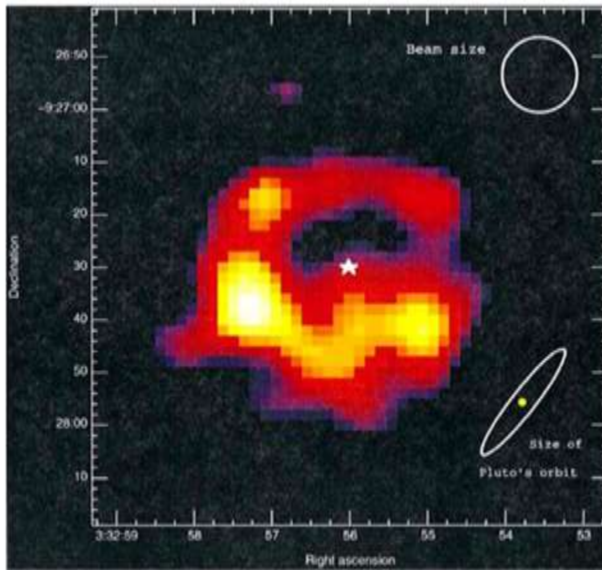



نصف القطر المميز للغبار المرصود حول العديد من النجوم التي تقع ضمن نطاق 100 فرسخ فلكي من الأرض. يمثل المحور الأيسر نصف القطر المميز للغبار من النجم الأم، أما المحور السفلي فيمثل درجة حرارة النجم (الدوائر السوداء)، بينما يمثل المحور العلوي نصف قطر النجم (المربعات المفتوحة)

بالنظر إلى الرسم البياني، يبلغ نصف القطر المميز الداخلي والخارجي لنظامنا الشمسي 10 وحدات فلكية و55 وحدة فلكية على التوالي. ومن المنطقي افتراض أن هذه المناطق من الغبار تحتوي أيضًا على عناصر أخرى (متجمدة)، مثل الهيدروكربونات والماء والجزيئات المتطايرة، التي غالبًا ما تُكتشف في الأطياف. تتوافق هذه المنطقة مع حزام كايبر، أو بتعبير أدق مع منطقة تمتد من مدار نبتون: من 30 وحدة فلكية إلى حوالي 55 وحدة فلكية.

[1] ) Zuckerman, B. and Song, I., Dusty debris disks as signposts of planets: implications for Spitzer space telescope, Astrophys. J. 603:738–743, 2004

## نجم ε-Eridani




تم إعادة إنتاج انبعاث الغبار حول ε-Eridani عند طول موجي 850 ميكرومتر في دراسة غريفز وآخرون. ويُشار إلى النجم برمز النجمة. ويُعتقد أن النظام يُرى تقريبًا من جهة القطب. ويُعرض حجم مدار بلوتو كمرجع

لم تتوفر أدلة تُذكر على وجود أنظمة شمسية حول أي نجم ذي طيف مشابه لشمسنا[1]. مع ذلك، يُظهر نجم ε-Eridani إبسيلون-إريداني، القريب نسبيًا (3.22 فرسخ فلكي)، بعض الخصائص المشابهة. وباستخدام كاميرا SCUBA عند أطوال موجية 850 ميكرومتر، تُشير دراسات حلقة الغبار حول إبسيلون-إريداني إلى ذروة كثافة عند حوالي 60 وحدة فلكية، مع انخفاض ملحوظ في الانبعاثات داخل نطاق 30 وحدة فلكية. تبلغ كتلة الحلقة 0.01 $M_\oplus$كتلة شمسية على الأقل (0.01 من كتلة الأرض)، مع حد أقصى قدره 0.4 $M_\oplus$ كتلة شمسية من الغاز الجزيئي استنادًا إلى رصد أول أكسيد الكربون.

يُقارن هذا المجموع بالكمية المُقدّرة لمواد مماثلة في المذنبات التي تدور في نظامنا الشمسي (0.33 $M_\oplus$ كتلة شمسية). يُظهر الشكل منطقة الحطام التي تدور حول إبسيلون-إريداني، والتي قد تُشير إلى المنطقة في نظامنا الشمسي التي ينبغي أن نبحث فيها عن "المياه العلوية".

[1] Greaves, J.S., Holland, W. S., Moriarty-Schieven, G., Jenness, T., Dent, W. R. F., Zuckerman, B., McCarthy, C., Webb, R. A., Butner, H. M., Gear, W. K. and Walker H. J., A dust ring around ε-Eridani: analog to the young solar system, Astrophys. J. 506:L133–L137, 1998

## نظام مجموعتنا الشمسية

يمتد حزام كايبر تقريبًا من مدار نبتون (30 وحدة فلكية) إلى حوالي 50 وحدة فلكية[1]. وحتى عام 2004، تم تحديد أكثر من 700 جرم كبير يصل قطرها إلى حوالي 1000 كيلومتر. أعتقد أن هذه المنطقة هي التي تضم حاليًا معظم ما تبقى من "المياه فوق" (أي ما يُعرف بـ"المياه فوق").

تشمل الأجرام العابرة لنبتون كلاً من بلوتو وقمره شارون، الذي تبلغ كتلته حوالي 12% من كتلة بلوتو. تبلغ كتلة بلوتو 0.002 $M_\oplus$ كتلة شمسية، وتتراوح درجة حرارة سطحه بين 35 و45 كلفن. يكون الماء صلبًا عند هذه الدرجة، بينما تتكثف الغازات الأخرى في صورة سائلة أو تتجمد. يتميز كل من بلوتو (قطره 2274 كم) وشارون (قطره 1172 كم) بكثافة أعلى قليلاً من كثافة جليد الماء، وهو ما يتوافق مع الأجرام الأخرى في حزام كايبر KBOs ، والتي تتكون في الغالب من الجليد وبعض الصخور.

تُكتشف حاليًا أجسام كبيرة أخرى في حزام كايبر، مثل كواوار وسيدنا، والتي يُعتقد أنها تتكون في معظمها من الجليد. يتكون كواوار (قطره حوالي 1250 كم)، الواقع على بُعد 43.6 AU وحدة فلكية، في الغالب من جليد منخفض الكثافة مختلط بالصخور، وهو ما يشبه إلى حد كبير تركيب المذنبات. أما سيدنا (قطره يُقدر بـ1700 كم) فيتراوح بُعده بين 76 و1000 وحدة فلكية في مدار بيضاوي الشكل للغاية. تبلغ كتلة كل منهما حوالي ثلث كتلة حزام الكويكبات[2]، أو حوالي $10^{-4}\,M_\oplus$ كتلة شمسية.

بسبب قربنا من الشمس، يصعب قياس الغبار في حزام كايبر بشكل مباشر. مع ذلك، يُرجّح أن يكون الكشف غير المباشر عن الغبار مؤشراً على وجود سحب من حبيبات أكبر وكتل من المواد المتجمدة في المنطقة الواقعة وراء نبتون.

إذا جمعنا تقديرات بلوتو ($2 \times 10^{-3}\,M_\oplus$) وشارون ($2.4 \times 10^{-4}\,M_\oplus$) مع تقدير لجميع أجرام حزام كايبر KBOs ($0.1\,M_\oplus$)) والمواد المذنبة (أقطار أقل من 10 كم)، فسنحصل على رقم قريب من $0.43\,M_\oplus$.

[1] Worraker, B.J., Missing: a source of short period comets, Journal of Creation 18(2):121–127, 2004 (
[2] www.space.com/scienceastronomy/sedna_earth_040316.html (

## تكوين "المياه العلوية"

من المعروف أن المذنبات عبارة عن كرات جليدية متسخة[1]، يصل قطرها إلى 10 كيلومترات (مذنب هالي على سبيل المثال). أرى أن مصطلح "المياه فوق" لا يقتصر على الماء الجزيئي ($H_2O$) فقط، رغم وجود كميات كبيرة منه في النظام الشمسي. ينبغي أن يشمل ذلك أيضاً أنواعاً أخرى من الجليد، مثل الهيدروجين الصلب (H) والأكسجين الصلب ($O_2$)، وكلاهما قد يكون مشتقاً من الماء.

تشير البيانات الحديثة المستقاة من التحليل الطيفي لسطح كواوار في نطاق 1 إلى 2.5 ميكرومتر إلى أن سطحه مغطى على الأقل بجليد مائي بلوري (وليس غير متبلور) وهيدرات الأمونيا، وكلاهما يحتوي على الماء. ويتوافق هذا مع كون تركيبه الأصلي جزءًا من الماء الذي انفصل عن "المياه الموجودة أسفله". علاوة على ذلك، ذُكر أن كلا النوعين من البلورات يجب أن يتحللا بفعل إشعاع الجسيمات عالية الطاقة على مدى $10^7$ سنوات. إن وجود هذه البلورات حتى الآن، وإن كان يتوافق مع حداثة النظام الشمسي، يُعد دليلًا ضد فرضية أن عمر النظام الشمسي يبلغ 5 مليارات سنة[2]. ولمواجهة هذا، استنتج الباحثون، انطلاقًا من منظور التطور الذي يُشير إلى عمر طويل للنظام الشمسي، أن كواوار لا بد أنه قد أُعيد تشكيل سطحه مؤخرًا بفعل اصطدامات أو انبعاثات بركانية جليدية.

بالإضافة إلى ذلك، فإن طيف كواوار، في نطاق 1 إلى 2.5 ميكرومتر، مشابه جدًا لطيف شارون، الذي يُشتبه منذ فترة طويلة بأنه جرم من حزام كايبر تم أسره. لذلك، فهو أيضًا يحتوي على كمية كبيرة من الماء، بالإضافة إلى أنواع أخرى من الجليد مثل هيدرات الأمونيا. وتتزايد الأدلة على أن هذه الأجرام قد تكون بقايا هالة مائية كما هو الحال في "المياه العلوية".

تجدر الإشارة أيضًا إلى أن كلاً من أورانوس، الذي يبعد 19 وحدة فلكية عن الشمس، ونبتون، الذي يبعد 30 وحدة فلكية، يتكونان في الغالب من الهيدروجين (85%)، وبنسبة أقل من الهيليوم، مع كميات ضئيلة من الميثان وغازات أخرى. تبلغ كتلة نبتون حوالي 17 $M_\oplus$ كتلة شمسية، بينما تبلغ كتلة أورانوس حوالي 14.5 $M_\oplus$ كتلة شمسية. مع ذلك، لم أُدرجهما ضمن "المياه العلوية" في هذا التحليل، على الرغم من أنهما يقعان ضمن

[1] www.solarviews.com/eng/comet.htm , 23 May 2005 (

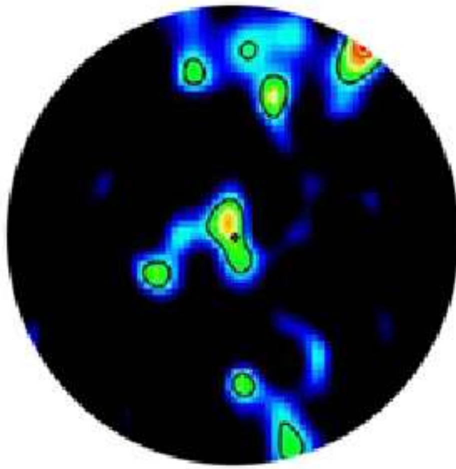
[2] Jewitt, D.C. and Luu, J., Crystalline water ice on Kuiper belt object (50000) Quaoar, Nature 432:731–733, 2004 (

نطاق 10-55 وحدة فلكية، وهو النطاق النموذجي لأقراص الحطام للنجوم الأخرى الشبيهة بالشمس في الشكل. من المرجح أنهما قد تشكلا لغرض آخر، كونهما جزءًا من الكواكب العملاقة الأربعة. ويبدو أن موقعهما الحالي - خارج مدار الكواكب الداخلية، بما فيها الأرض - يهدف إلى منع الأجسام الكبيرة التي قد تُلحق الضرر بالأرض من الاصطدام بها. يعمل كوكب المشتري تحديدًا (الذي يحتوي على كتلة أكبر من كتلة جميع الكواكب الأخرى مجتمعة) كمكنسة كهربائية كونية، جاذبًا المذنبات الضالة للاصطدام به بدلًا من انتقالها إلى النظام الشمسي الداخلي.

## مشاكل النماذج التطورية

لم تُظهر الأقراص الكوكبية، أو الأقراص المحيطة بالنجوم التي يُعتقد أنها تتطور إلى أنظمة كوكبية، أي اتجاه واضح فيما يتعلق بعمرها التطوري المفترض. كان علماء الكونيات العلمانيون يتوقعون أنه مع تقدم عمر النجم، سيتطور قرصه المرتبط به أيضًا نحو أنظمة شمسية مثل نظامنا الشمسي. من المفترض أن تقل كمية الغاز بمرور الوقت مع تشكل الكويكبات الصغيرة التي تصبح في النهاية كواكب. وقد نُقل عن إحدى الدراسات التي أجريت على ستة نجوم من نوع تي-تاوري قولها:

إن غياب اتجاهات تطورية واضحة أمرٌ مثيرٌ للدهشة إلى حدٍ ما، بالنظر إلى أن النجوم اختيرت وفقًا لتسلسل أعمارها على مدى حقبة تمتد حتى حوالي 15 مليون سنة، والتي يُعتقد أن الغاز يختفي بعدها. كما أن الظروف الأولية كان من المفترض أن تكون متشابهة، نظرًا لأن الأهداف تقع في منطقة واحدة لتكوين النجوم. لذلك، كان من المتوقع أن تتغير الأقراص بشكل منهجي مع مرور الوقت، حتى في العينة محدودة الحجم التي دُرست هنا[1].



صورة τ-Ceti بحجم 850 μm . يشير المعين المركزي إلى موقع النجم. يُعتقد أن المنطقة المحيطة به، والتي تشبه حبة الفول السوداني، هي قرص الحطام المرئي من الأمام تقريبًا

يبدو أن مخزونًا كبيرًا من الغاز لا يزال موجودًا خلال المرحلة الممتدة من مليون إلى عشرة ملايين سنة لأنظمة تي-تاوري T-Tauri ، إذا ما اعتبرنا هذه الأنظمة مؤشرًا على تغير تطوري. وقد أثار هذا الأمر دهشة غريفز، مؤلف الدراسة، الذي صرّح لاحقًا بما يلي: وبالتالي لم يتم تأكيد الاتجاهات التطورية المتوقعة... . تتشابه أقراص الغاز الكثيفة عمومًا في الحجم بغض النظر عن العمر... ولم يتم تأكيد وجود تجويف خالٍ إلا بالنسبة لأقدم نجم.

يتبنى غريفز Greaves فكرة أن تطور هذه الأنظمة النجمية أمرٌ لا مفر منه. ولكن لماذا؟ في نهاية المطاف، يقود التفكير الطبيعي هذه التوجهات الفكرية. هل يُعقل ألا تتطور النجوم والأنظمة النجمية وفقًا للتوقعات؟ إن فرضية السديم، في أحسن الأحوال، ضعيفة البناء، وتعاني من مشاكل عديدة في نشأة الكون. ويشير غريفز إلى

[1] Greaves, ref. 20, p. L103 (

أن نجمًا واحدًا فقط من النجوم المدروسة يُظهر منطقة في النظام الشمسي الداخلي خالية من الغبار كما هو متوقع في النموذج (مع تطور القرص الأولي، تُفرغ المنطقة الداخلية تدريجيًا مع انبعاث الغاز والغبار من النجم، وامتصاص الكواكب الأكبر حجمًا له، وهكذا).

لكن إذا كان نموذج الخلق الذي اقترحته سابقًا صحيحًا، فمن المحتمل أن تكون النجوم القريبة شديدة الشبه بأشكالها الأصلية (أي أنها لم تتغير بشكل ملحوظ). وبما أن الدراسة التي استشهد بها غريفز كانت لنجوم في منطقة في كوكبة الثور تبعد حوالي 140 فرسخًا فلكيًا، فمن المحتمل أن تكون هذه المنطقة قريبة من حافة المنطقة الفضائية التي اقترحتُ أنها شهدت تمددًا زمنيًا هائلًا[1]. وقد حدث هذا التمدد بشكل أساسي في نظامنا الشمسي، ولكنه شمل مناطق في الفضاء المحيط.

لذا، يُعدّ التفسير الأنسب لأنظمة الغاز والغبار القريبة المرصودة هو أنها لم تتغير كثيرًا عن حالتها الأصلية. إذا كان الأمر كذلك، فمن المنطقي إجراء مقارنات لتكوين فكرة عن موقع وحجم "المياه العلوية". في الدراسة المذكورة، امتدت المناطق الغازية بمسافات متفاوتة، من بضع عشرات من الوحدات الفلكية إلى 100- 200 AU وحدة فلكية، وأحيانًا أكثر، وذلك تبعًا للنموذج المستخدم لتحليل البيانات.

[1] Hartnett, J.G., A new cosmology: solution to the starlight travel time problem, Journal of Creation 17(2):98–102, 2003

## النظامالنجمي τ-Ceti



ربما شملت "المياه التي فوق" المذكور في تكوين 7:1 المذنبات، التي تتكون في معظمها من جليد الماء. ومن المعروف أن أجساما كبيرة، مثل المذنبات، اصطدمت بالأرض في الماضي. ولا يزال بإمكاننا رؤية فوهات نيزكية حتى اليوم، مثل فوهة Manicougan في Quebec، كندا، التي يبلغ قطرها أكثر من 70 كيلومترًا، وهي واحدة من أكبر الفوهات وأكثرها وضوحًا على كوكب الأرض

تشير المعلومات المتاحة إلى أن نجم تاو-سيتي τ-Ceti هو أقرب النجوم شبهاً بشمسنا. يحيط به قرص من الحطام، ويُعتبر نظيراً ضخماً لحزام كايبر[1].

يُصنَّف نجم تاو-سيتي كنجم من النوع G8 V، ويقع على بُعد حوالي 3.65 فرسخ فلكي من الشمس. ويمتد قرص الحطام المحيط به إلى حوالي 55 وحدة فلكية، وفقًا لدراسات انبعاثات الأشعة تحت الحمراء البعيدة باستخدام الطول الموجي 850 ميكرومتر في كاميرا SCUBA. ومع ذلك، أظهرت النماذج، استنادًا إلى افتراضات التطور، وجود مجموعة من الأجسام المتصادمة (يتراوح قطرها بين 10 و50 كيلومترًا) تُجدد الغبار والحطام باستمرار. وبالتأكيد، من منظور نموذج التطور، لا يُعد هذا مكانًا مناسبًا لنشوء الحياة، كما أشار جاستن تايلور[2].

في النماذج القياسية لتكوين الكواكب، مع تطور القرص الأولي للسديم، يتسطح، وتتشكل الأجسام الأكبر حجمًا نتيجة التراكم. يكون تطور الأجسام البعيدة عن النجم أبطأ، لذا عند مسافات مثل مسافة بلوتو، من المفترض أن تكون أعداد الأجسام الكبيرة قليلة جدًا، وبالتالي يصعب رصدها. مع ذلك، يمكن أن تتجدد الجسيمات باستمرار من خلال تصادمات الكويكبات التي يبلغ حجمها كيلومترات، وهي إحدى الظواهر الأكثر قابلية للرصد حول النجوم. ومع ذلك، يقول غريفز إن تطور الحطام النجمي لا يزال غير مفهوم بشكل كافٍ.

من بين النجوم، تاو-سيتي τ-Ceti، إبسيلون-إريداني ε-Eridani، والشمس، تتميز شمسنا بأقل كمية من الغبار والحطام، ومن هنا يأتي أصغر حزام كايبر. هذا يجعل الوضع في نظامنا الشمسي الأكثر ملاءمة للحياة، مع عدد قليل فقط من القصف بالكويكبات والمذنبات.

---

[1] Greaves, J.S., The debris disc around τ-Ceti: a massive analogue to the Kuiper Belt, M.N.R.A.S. 351:L54–L58, 2004 (

[2] Taylor, J.K., New discovery makes habitable worlds even less likely, Journal of Creation 19(1):19, 2005 (

## نظائر شمسية Solar analogues

يبلغ مجموع كتل الأجسام المتصادمة في نظام تاو-سيتي حوالي 1.2 ⊕M كتلة شمسية، مقارنةً بتقديرات حزام كايبر البالغة 0.1 ⊕M كتلة شمسية. ومع ذلك، يُزعم أن عمر هذا النظام يبلغ 10 Gyr مليارات سنة، أي ضعف عمر نظامنا الشمسي. أما نظام إبسيلون-إريداني، فيُزعم أن عمره 0.73 Gyr مليار سنة، وهو يُشابه المراحل المبكرة من تاريخ نظامنا الشمسي (وفقًا للنموذج التطوري). وبافتراض أن هذه الأنظمة ليست قديمة كما يُزعم، يُمكننا استخدامها كأمثلة لنظامنا الشمسي في مراحل مختلفة من تاريخه، قبل وبعد اللعنة أو الطوفان.

تقع الحطام المحيط بنجم تاو-قيثي في منطقة مشابهة لحزام كايبر، حيث تدور معظم الأجسام المكتشفة على مسافة تتراوح بين 35 و50 وحدة فلكية. في هذه المنطقة من نظامنا الشمسي، توجد الأجسام الشبيهة بالمذنبات في الغالب على شكل أجسام كبيرة، يصل حجمها إلى عشرات الكيلومترات. قد يكون تاو-قيثي نظيرًا لعالم ما قبل الطوفان، حيث كان تركيز هذا النوع من المواد المذنبة أعلى بكثير. ولكن بفضل قدرة الله، بقيت هالة الحطام في المنطقة الواقعة وراء نبتون حتى حان وقت الحساب في زمن نوح. في النظام الشمسي بعد الطوفان، انخفضت الكثافة بشكل كبير، وأصبحت الاصطدامات مع الأرض نادرة.

يُستدل على الحجم ومعدل الاصطدام من افتراضات العمر التطوري. يُفترض أن عمر النجم تاو-قيثي يبلغ 10 Gyr مليارات سنة استنادًا إلى التحليل الطيفي، ومخطط التسلسل الرئيسي، والنموذج التطوري لنمو النجوم. ما يُرصد فعلياً هو طيف إشعاع الجسم الأسود لحبيبات الغبار عند درجة حرارة تقارب 60 K كلفن. ثم تُقدّر كتلة الغبار من التدفق عند 850 µm flux ، ودرجة الحرارة عند 60 K كلفن، والشفافية المفترضة للسحابة. وتُقدّر هذه الكتلة بنحو 20 ضعفاً لكتلة الغبار في نظامنا الشمسي، ولكنها تبقى غير مؤكدة.

بغض النظر عن الافتراضات التطورية، ربما كان النظام الشمسي قبل الطوفان يتمتع بكثافة أعلى بكثير من الأجرام المذنبة الكبيرة، والتي اختفت منذ ذلك الحين من النظام الشمسي أو اصطدمت بالكواكب والشمس. عندما فصل الله "المياه التي فوق"، من المرجح أنه خلق هالة كبيرة من مادة المذنبات التي تبددت لاحقًا (ربما بنسبة تصل إلى 99%) أثناء اللعنة، ومرة أخرى أثناء الطوفان[1]. أزعم أن هذه الهالة من مادة المذنبات هي ما خلقه الله عندما فصل "المياه التي فوق".

---

[1] ( Faulkner, D., A biblically-based cratering theory, Journal of Creation 13(1):100–104, 1999

تشير الملاحظات الحديثة لأطياف الأشعة تحت الحمراء القريبة لجسم كواوار Quaoar في حزام كايبر، والجسم المشتبه به شارون Charon، إلى احتوائهما على جليد مائي بلوري وهيدرات الأمونيا. لا يمكن أن يتجاوز عمر هذه المادة المائية 10 ملايين سنة، وهو ما يتوافق مع نظام شمسي حديث، وليس نظامًا عمره 5 مليارات سنة. هذه نتائج كمية، تُضاف إلى ما نعرفه بالفعل عن المذنبات والأجرام الأخرى العابرة لنبتون، لتشكل دليلًا قويًا على صحة نموذج الأرض الفتية.

إذا انطلقنا من منظور الخلق، فإنّ الملاحظات الحديثة لبعض الأنظمة النجمية القريبة التي تحتوي على كميات كبيرة من الغبار والحطام تُقدّم لنا أدلةً على بنية نظامنا الشمسي في الماضي. هذه الملاحظات تدفعني إلى اقتراح أن "المياه العلوية" الحالية (الأجرام ما وراء نبتون) ليست سوى بقايا صغيرة من "المياه العلوية" التي سبقت الطوفان. لا تزال معظم هذه المادة مُتجمّدة في جليد من نوع أو آخر. لذلك، يتوقع هذا النموذج العثور على المزيد من الأجرام ما وراء نبتون ومواد شبيهة بالمذنبات، تتألف في معظمها من جليد مائي.

ربما احتوت "المياه العلوية" التي سبقت الطوفان على ما يصل إلى 100 ضعف كمية المادة الموجودة حاليًا وراء نبتون. إذا صحّ هذا، لكانت كتلتها تُعادل 43 ضعف كتلة الأرض، وهو ما كان سيُمثّل بالتأكيد غلافًا مائيًا ضخمًا يُحيط بنظامنا الشمسي. ربما امتصت الكواكب العملاقة جزءًا كبيرًا من هذه المياه نتيجةً لاضطراب "المياه العلوية" خلال اللعنة والطوفان. وبالطبع، يوجد بعضها (بنسبة أقل بكثير) على الأرض. وهذا يُضفي دلالةً مختلفةً على انفصال المياه في اليوم الثاني من أسبوع الخلق. وقد اقترحتُ في ورقة بحثية أخرى غرضًا آخر لهذه الهالة من "المياه العلوية" إلى جانب ما ذُكر هنا، ألا وهو حماية الأرض من الإشعاع القاتل خلال أسبوع الخلق الناتج عن التوسع السريع للكون[1].

[1] Hartnett, J.G., Cosmological expansion in a creationist cosmology, Journal of Creation 19 (

## رصد تلسكوب جيمس ويب بخار الماء في منطقة تكوين الكواكب الصخرية

رصدت قياسات جديدة أجراها جهاز MIRI (جهاز الأشعة تحت الحمراء المتوسطة) التابع لتلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا، وجود بخار الماء في القرص الداخلي للنظام[1]، على مسافة تقل عن 160 مليون كيلومتر من النجم - وهي المنطقة التي يُحتمل أن تتشكل فيها الكواكب الصخرية الشبيهة بالأرض. (تدور الأرض على بعد 140 مليون كيلومتر من شمسنا). ويُعد هذا أول رصد للماء في المنطقة الشبيهة بالأرض من قرص معروف باحتوائه على كوكبين أو أكثر من الكواكب الأولية. لقد رصدنا وجود الماء في أقراص أخرى، لكن ليس بهذه القرب وفي نظام تتشكل فيه الكواكب حاليًا. لم نتمكن من إجراء هذا النوع من القياسات قبل تلسكوب جيمس ويب الفضائي،" هذا ما قالته المؤلفة الرئيسية للدراسة، جوليا بيروتي، من معهد ماكس بلانك لعلم الفلك (MPIA) في هايدلبرغ، ألمانيا.

وأضاف توماس هيننغ Thomas Henning، مدير معهد ماكس بلانك لعلم الفلك والمؤلف المشارك في الدراسة: "هذا الاكتشاف مثير للغاية، إذ يكشف المنطقة التي تتشكل فيها الكواكب الصخرية الشبيهة بالأرض عادةً". يُذكر أن هيننغ هو الباحث الرئيسي المشارك في جهاز MIRI (جهاز الأشعة تحت الحمراء المتوسطة) التابع لتلسكوب جيمس ويب الفضائي، والذي حقق هذا الاكتشاف، والباحث الرئيسي في برنامج MINDS (مسح قرص الأشعة تحت الحمراء المتوسطة باستخدام جهاز MIRI) الذي جمع البيانات.

النجم PDS 70 هو نجم من النوع K، أبرد من شمسنا، ويُقدّر عمره بنحو 5.4 مليون سنة. يُعدّ هذا العمر متقدمًا نسبيًا بالنسبة للنجوم التي تمتلك أقراصًا لتكوين الكواكب، مما جعل اكتشاف بخار الماء فيه أمرًا مُثيرًا للدهشة. مع مرور الوقت، يتناقص محتوى الغاز والغبار في الأقراص التي تتشكل فيها الكواكب. إما أن إشعاع النجم المركزي ورياحه تُبدّد هذه المواد، أو أن الغبار ينمو ليُشكّل أجسامًا أكبر تُكوّن الكواكب في نهاية المطاف. ولأن الدراسات السابقة لم ترصد وجود الماء في المناطق المركزية لأقراص مماثلة في العمر، فقد اشتبه علماء الفلك في أنه قد لا ينجو من الإشعاع النجمي القاسي، مما يُؤدي إلى بيئة جافة لتكوين أي كواكب صخرية.

لم يرصد علماء الفلك حتى الآن أي كواكب تتشكل داخل القرص الداخلي للنجم PDS 70. ومع ذلك، فقد رصدوا المواد الخام اللازمة لتكوين عوالم صخرية على شكل سيليكات. ويشير اكتشاف بخار الماء إلى أنه إذا

[1] ( https://science.nasa.gov/missions/webb/webb-detects-water-vapor-in-rocky-planet-forming-zone/

كانت الكواكب الصخرية تتشكل هناك، فسيكون الماء مُتاحًا لها منذ البداية. "لقد وجدنا كمية كبيرة نسبياً من حبيبات الغبار الصغيرة. وبالإضافة إلى اكتشافنا لبخار الماء، فإن القرص الداخلي مكان مثير للغاية"، كما قال المؤلف المشارك رينز ووترز من جامعة رادبود في هولندا.

يثير هذا الاكتشاف تساؤلاً حول مصدر الماء. وقد درس فريق MINDS سيناريوهين مختلفين لتفسير هذه النتيجة. أحد الاحتمالات هو أن جزيئات الماء تتشكل في مكانها، حيث رصدناها، نتيجة اتحاد ذرات الهيدروجين والأكسجين. أما الاحتمال الثاني فهو أن جزيئات الغبار المغلفة بالجليد تُنقل من القرص الخارجي البارد إلى القرص الداخلي الساخن، حيث يتسامى جليد الماء ويتحول إلى بخار. سيكون نظام النقل هذا مفاجئًا، إذ سيتعين على الغبار عبور الفجوة الكبيرة التي أحدثها الكوكبان العملاقان.

ومن الأسئلة الأخرى التي يثيرها هذا الاكتشاف كيف يمكن للماء أن يبقى على مقربة من النجم، في حين أن الأشعة فوق البنفسجية الصادرة عنه من المفترض أن تُفكك أي جزيئات ماء. على الأرجح، تعمل المواد المحيطة، كالغبار وجزيئات الماء الأخرى، كدرع واقٍ. ونتيجة لذلك، يمكن للماء المكتشف في القرص الداخلي لنجم PDS 70 أن ينجو من التدمير. في نهاية المطاف، سيستخدم الفريق جهازين إضافيين من أجهزة تلسكوب جيمس ويب، وهما كاميرا الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIRCam) ومطياف الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIRSpec)، لدراسة نظام PDS 70 بهدف التوصل إلى فهم أعمق له.

## محاولة لتفسير مصدر مياه الكرة الأرضية

لا يزال العلماء العلمانيون يكافحون لتفسير أصل مياه الأرض. وقد شككت دراسة جديدة نُشرت في مجلة ساينس في افتراضاتهم وتوقعاتهم السابقة.

من خلال مقارنة التركيب الكيميائي لنوع نادر من النيازك بالتركيب الكيميائي لصخور الأرض، خلص الباحثون إلى أن الأرض كانت على ما يبدو غنية بالماء منذ البداية، بل ربما بكمية تكفي لملء المحيطات ثلاث مرات. لا ينبغي أن يكون وجود الماء على الأرض البدائية مفاجئًا للمسيحيين المؤمنين بالكتاب المقدس الذين يعلمون أن الله خلق أرضًا غنية بالماء في بداية أسبوع الخلق. لكن يبدو أن هذا لم يكن ما توقعه هؤلاء العلماء[1].

أوضحت لوريت بياني Laurette Piani، المؤلفة الرئيسية للدراسة من جامعة لورين في فرنسا، وزملاؤها سبب دراستهم قائلين: "لا يزال أصل مياه الأرض مجهولًا. تتميز نيازك الإينستاتيت الكوندريتية Enstatite chondrite EC)) بتركيب نظائري مشابه للصخور الأرضية، وبالتالي قد تكون ممثلة للمادة التي شكلت الأرض[2].

الإينستاتيت معدن شائع نسبيًا يوجد في الصخور النارية والمتحولة على سطح الأرض. أما نيازك الإينستاتيت الكوندريتية فهي نادرة، إذ تشكل حوالي 2% من جميع النيازك الكوندريتية (أو الحجرية). افترض العلماء سابقًا أن هذه النيازك لا تحتوي على ماء، نظرًا لتوقعات فرضية السديم بأنها تشكلت في أشد مناطق النظام الشمسي الداخلي حرارة.

درس مؤلفو الورقة البحثية الجديدة 13 نيزكًا من الإينستاتيت الكوندريتية، ووجدوا أنها تحتوي على كمية من الهيدروجين تفوق بكثير ما كان يُعتقد سابقًا. علاوة على ذلك، كانت نسب نظائر الهيدروجين المستقرة متطابقة تقريبًا مع صخور وشاح الأرض، الذي يشكل حوالي 80% من حجمها. والهيدروجين، بطبيعة الحال، هو أحد العنصرين الكيميائيين المكونين للماء. صرحت بياني قائلةً: "تُعدّ هذه النيازك من أفضل النماذج المتوفرة لدينا لتكوين الأرض، وهي ليست جافة كما كنا نعتقد. من المحتمل أن يكون هذا الماء قد دخل في تكوين الأرض طوال عملية تكوينها."

---

[1] Piani, L. et al. 2020. Earth’s water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. Science. 369 (6507): 1110–1113

[2] Crane, L. Earth may have formed with enough water to fill the oceans three times. NewScientist. Posted on NewScientist.com August 27, 2020, accessed September 3, 2020

لطالما افترض علماء نظرية التطور التدريجي أن ماء الأرض نشأ من إضافة بطيئة لنيازك الكوندريت الكربونية التي تحتوي على معادن مائية، والتي أتت من الجزء الخارجي الأبرد من النظام الشمسي النامي، حيث كان يُعتقد أن الماء أكثر وفرة. يتعارض هذا الطرح الذي قدمته بياني وفريقها مع هذا السيناريو، إذ يُشير إلى أن الماء بدأ بالتراكم على الأرض منذ بداية تكوينها. في الرواية السائدة، بدأت الأرض في حالة منصهرة ساخنة. ألا تُؤدي هذه الحرارة المرتفعة، بالإضافة إلى حرارة اصطدامات النيازك المفترضة، إلى تبخير جزء كبير من هذا الماء البدائي، مما يُناقض هذه النتائج الجديدة؟

اقترح علماء غير دينيين على مر السنين آليات مختلفة لتفسير أصل الماء على الأرض (وصوله عبر النيازك الكربونية، أو المذنبات، أو حتى كونه ناتجًا عن الاصطدام الذي يُفترض أنه شكّل قمرنا). واستمرارهم في اقتراح آليات جديدة حتى اليوم يُظهر أن أياً من هذه التفسيرات غير مقنع.

على الرغم من استنتاجاتهم الخاطئة، يبدو أن فريق بياني قد توصل إلى حقيقة يعرفها معظم المؤمنين بالكتاب المقدس: أن الأرض في بداياتها كانت مليئة بالماء.

في سفر التكوين، يخبرنا الله بالتفصيل كيف خلق الأرض. استخدم الماء وقسمه وفصله أثناء تشكيله للأرض لتكون صالحة للسكن في الأيام الثلاثة الأولى من أسبوع الخلق. مع أن الله لم يستخدم النيازك لتكوين المادة المائية الأصلية للأرض، إلا أنه استخدم الماء بكثرة خلال أسبوع الخلق.

## توجد محيطات تحت سطح قمرين من أقمار أورانوس؟



خلص فريق من الباحثين بقيادة عالم الكواكب الدكتور كاليب ستروم Caleb Strom من جامعة نورث داكوتا North Dakota إلى أن قمري أورانوس[1]، أريبل Ariel وميراندا Miranda، كانا يحتويان في السابق على محيطات مائية في باطنهما. وقد توصلوا إلى هذه النتائج، المنشورة في مجلتي "إيكاروس" و"مجلة علوم الكواكب"، من خلال دراسة الشقوق، أو ما يُعرف بتشققات الإجهاد، على سطحي القمرين، وباستخدام نماذج حاسوبية لتحديد الظروف الداخلية اللازمة لظهور هذه الشقوق[2].

تنتج هذه الشقوق الإجهادية عن قوى الجذب التي يمارسها كوكب أورانوس على قمري أريبل وميراندا، وبدرجة أقل، عن أقمار أورانوس الأخرى. تُشوّه هذه القوى ببطء شكل هذين القمرين، فتصبح أشكالهما أحيانًا أقرب إلى شكل كرة القدم الأمريكية منها إلى الكرة. كما يمكن لهذه القوى أن تُسخّن باطن الأقمار الصغيرة مثل أريبل وميراندا. وتزداد هذه القوى قوةً عندما تكون مدارات أريبل وميراندا ذات انحراف مركزي أعلى، أي عندما تكون مداراتهما حول أورانوس أكثر استطالةً. وكما أوضح الدكتور أليكس باتوف، المؤلف المشارك في ورقة بحثية عن إيكاروس، "لتكوين هذه الشقوق [على سطح أريبل]، لا بد من وجود طبقة جليد رقيقة جدًا على محيط شاسع، أو انحراف مركزي أعلى ومحيط أصغر... ولكن في كلتا الحالتين، نحتاج إلى محيط لنتمكن من تكوين الشقوق التي نراها على سطح أريبل"[3].

---

[1] Kelley, M. M. Uranian Moon Ariel's Surface Features Point to a Past Ocean Over 100 Miles Deep. Phys.org. Posted on phys.org September 29, 2025, accessed September 29, 2025 ; Kelley, M. M. Is There an Ocean Lurking Beneath One of Uranus' Moons? Planetary Science Institute. Posted on psi.edu November 17, 2024, accessed September 29, 2025

[2] Strom, C. et al. 2024. Constraining Ocean and Ice Shell Thickness on Miranda from Surface Geological Structures and Stress Modeling. The Planetary Science Journal. 5 (226): 1–18 ; Strom, C. et al. 2026. Constraining Ocean and Ice Shell Thickness on Ariel from Surface Geologic Structures and Stress Mapping. Icarus. 444: 116822

[3] Kelley, M. M. Uranian Moon Ariel's Surface Features Point to a Past Ocean Over 100 Miles Deep. Phys.org. Posted on phys.org September 29, 2025, accessed September 29, 2025

ينطبق منطق مماثل على ميراندا. في الواقع، لم يستبعد العلماء وجود محيط سائل داخل ميراندا. يعتقد بعض الباحثين أن ما يصل إلى 23 جرمًا في نظامنا الشمسي، بخلاف الأرض، قد تحتوي على ماء متجمد أو سائل[1]. وإذا أُضيفت أريل وميراندا إلى هذه القائمة، سيرتفع العدد إلى 25.

هناك أدلة قوية نسبيًا على وجود ماء سائل داخل قمر إنسيلادوس التابع لكوكب زحل وقمر أوروبا التابع لكوكب المشتري. في الواقع، يتمثل أحد أهداف مهمة يوروبا كليبر في محاولة التحقق مما إذا كان يوروبا يحتوي على محيط تحت سطحه. كما نُشرت أدلة على وجود محيط تحت سطح قمر زحل ميماس في العام الماضي في مجلة نيتشر[2].

ثانيًا، يُعد وجود الماء السائل على هذه الأقمار دليلًا على حداثة عمرها. فالكواكب والأقمار الصغيرة تشع الحرارة بسرعة إلى الفضاء، لذا فمن المرجح أن يكون أي ماء بداخلها قد تجمد منذ دهور. لهذا السبب تحديدًا، فوجئ الباحثون التقليديون بالأدلة الجيولوجية التي تشير إلى وجود مياه سائلة سابقة (أو متبقية) على ميراندا وأقمار أخرى: "نظرًا لصغر حجم ميراندا وقدمها، لم يتوقع العلماء وجود محيط فيها. بل افترضوا أن أي حرارة متبقية من تكوينها قد تبددت منذ زمن بعيد[3].

[1] Wenz, J. and M. Wagh. There Are 23 Moons and Planets with Water in Our Solar System. Popular Mechanics. Posted on popularmechanics.com, last updated December 8, 2022, accessed September 29, 2025

[2] Hebert, J. Jupiter's Young Moons. Acts & Facts. 52 (5): 14–16

[3] Kelley, M. M. Is There an Ocean Lurking Beneath One of Uranus' Moons? Planetary Science Institute. Posted on psi.edu November 17, 2024, accessed September 29, 2025

## أنهار قديمة على سطح المريخ

استخدم الجيولوجيون صورًا عالية الدقة التقطها مسبار استطلاع المريخ المداري لاستنتاج وجود أنهار قديمة على سطح المريخ. قاد الجيولوجي فرانشيسكو ساليزي من جامعة أوتريخت في هولندا الفريق الذي حلل صور نتوء رسوبي في الحافة الشمالية الغربية لهيلاس بلانيتيا، وهي حوض اصطدام في نصف الكرة الجنوبي للمريخ[1].

لطالما اعتقد الجيولوجيون وعلماء الكواكب بوجود مياه سائلة على سطح المريخ في الماضي، بل إن المريخ يُظهر أدلة على فيضانات كارثية. ومع ذلك، أفاد فريق من العلماء أن هذه هي المرة الأولى التي يتمكنون فيها من تحديد تاريخ ومدة وجود هذا النظام النهري. وذكروا أن هذا النظام النهري استمر في التدفق لمئات آلاف السنين، أي قبل حوالي 3.7 مليار سنة[2].

بطبيعة الحال، يرفض علماء الخلق هذا التقدير الزمني العميق. غالبًا ما تُستنتج التواريخ النسبية من عدد الفوهات على سطح الكوكب[3]. ومع ذلك، تُستخدم طرق التأريخ بالنظائر المشعة للنيازك والأرض وصخور القمر لتحويل هذه التواريخ النسبية إلى تواريخ مطلقة. على الرغم من أن علماء التطور التدريجي كانوا قد قبلوا فكرة "ملايين السنين" قبل اختراع طرق التأريخ بالنظائر المشعة، إلا أن التأريخ بالنظائر المشعة يُعدّ، بلا شك، "الدليل" الرئيسي على الزمن العميق[4]. لكن علماء الخلق وجدوا أسبابًا وجيهة للتشكيك في الافتراضات الأساسية لهذه الطريقة، بما في ذلك افتراض أن معدلات التحلل الإشعاعي كانت دائمًا بطيئة. فعلى سبيل المثال، تُعطي طرق التأريخ بالنظائر المشعة المختلفة، المستخدمة على نفس الوحدة الصخرية، تقديرات عمرية متباينة، حتى عند أخذ الشكوك التحليلية في الحسبان[5]. ومن المثير للاهتمام أن أنصار نظرية الخلق لاحظوا

---

1) Weitereng, H. Mars orbiter finds evidence of ancient, long-lived rivers on the Red planet. Space.com. Posted on space.com May 12, 2020, accessed May 13, 2020
Salese, F., et al. 2020. Sustained fluvial deposition recorded in Mars' Noachian stratigraphic record. Nature Communications. 11 (2067)

2) Gohd, C. Catastrophic Floods Rapidly Carved the Surface of Mars. Discover. Posted on discover.com November 19, 2018, accessed May 13, 2020

3) Coppedge, D. F. 2007. Crisis in Crater Count Dating. Acts & Facts. 36 (1)

4) Morris, J. D. 2011. The Failed History of Uniformitarianism. Acts & Facts. 40 (12): 15

5) Snelling, A. A. 2005. Isochron Discordances and the Role of Inheritances and Mixing of Radioisotopes in the Mantle and Crust. In Radioisotopes and the Age of the Earth: Results of a Young-Earth Creationist Research Initiative, Volume 2. L. Vardiman, A. A. Snelling, and E. F. Chaffin, eds. El Cajon, CA: Institute for Creation Research and Chino Valley, AZ: Creation Research Society, 393–524

نمطًا معينًا: فكلما كان النظير المشع المستخدم في عملية التأريخ أثقل، زاد تقدير العمر[1]. ويمكن تفسير هذا التباين بافتراض وجود عامل ما تسبب في تحلل النظائر المشعة المختلفة بمعدلات متباينة في وقت أو أوقات سابقة. ولا يزال علماء الخلق يعملون على حل المسائل العالقة المتعلقة بالتحلل النووي المتسارع (وخاصةً فيما يتعلق بالتخلص الآمن من الحرارة الزائدة المتولدة)، إلا أن الأدلة على حدوث تحلل نووي متسارع في الماضي قوية، مما يُبطل الأعمار المحسوبة من معدلات التحلل النووي تلك[2].

لطالما لاحظ أنصار نظرية الخلق المفارقة في أن الجيولوجيين الذين يؤمنون بنظرية التطور التدريجي لا يجدون غضاضة في حدوث فيضانات كارثية على المريخ[3]، وهو عالم لا يوجد عليه اليوم ماء سائل على سطحه، بينما يرفضون هذا الاحتمال بالنسبة للأرض! على عكس المريخ، تُعد الأرض عالمًا مائيًا، حيث لا يزال أكثر من 70% من سطحها مغمورًا بالمياه. وتُغطى معظم سطحها بصخور رسوبية ترسبت بفعل المياه، وتحتوي على بقايا مليارات من النباتات والحيوانات المتحجرة. علاوة على ذلك، تحتفظ العديد من الثقافات حول العالم بذكريات عن طوفان كارثي مماثل للطوفان الموصوف في الكتاب المقدس، وهو ما يُتوقع حدوثه لو كان الطوفان حدثًا تاريخيًا حقيقيًا. ومع ذلك، يقول العلماء الذين يؤمنون بنظرية التطور التدريجي إنه "لا يوجد دليل" على حدوث طوفان عالمي على هذا الكوكب! ومن المفارقات أيضًا أن الجيولوجيين العلمانيين يستخدمون مصطلحات مثل "نوحية" لوصف التكوينات الجيولوجية التي تشكلت بفعل المياه على المريخ[4]، على الرغم من أنهم سيرفضون استخدام هذا المصطلح لوصف معالم الطوفان على الأرض! من اللافت للنظر أن الجيولوجيين المتمسكين بنظرية التطور التدريجي يعتقدون أن الأخاديد على سطح المريخ نحتتها المياه بسرعة فائقة. مع أن العلماء لاحظوا نحت المياه للأخاديد بسرعة على الأرض[5]، ومع أن الأدلة الميدانية ترجح بقوة نشأة سريعة للوادي الكبير[6]، إلا أن العلماء العلمانيين يصرون على الادعاء بأن الوادي الكبير نُحت ببطء على مدى ملايين السنين!

---

[1] Vardiman, L. 2007. RATE in Review: Unresolved Problems. Acts & Facts. 36 (12): 6 (

[2] Humphreys, D. R. 2005. Young Helium Diffusion Age of Zircons Supports Accelerated Nuclear Decay. In ( Radioisotopes and the Age of the Earth: Results of a Young-Earth Creationist Research Initiative, Volume 2. L. Vardiman, A. A. Snelling, and E. F. Chaffin, eds. El Cajon, CA: Institute for Creation Research and Chino Valley, AZ: Creation Research Society, 25-99

(8) Snelling, A. A. 2005. Polonium Radiohalos: The Model for Their Formation Tested and Verified. Acts & Facts. 34

[3] (9) Morris, H. M. 1997. Where has All the Water Gone? Acts & Facts. 26 (

[4] (11) Morris, J. D. 2014. Traditions of a Global Flood. Acts & Facts. 43 (

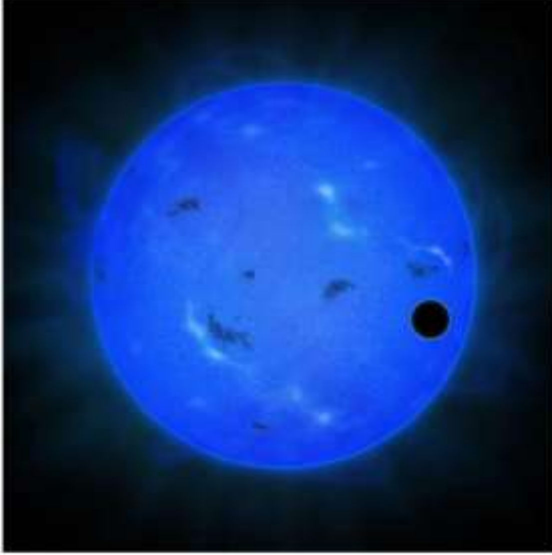
[5] ) Thomas, B. 2010. Texas Canyons Highlight Geologic Evidence for Catastrophe. Creation Science Update. Posted on ICR.org July 8, 2010, accessed May 13, 2020

[6] ) Clarey, T. 2018. Grand Canyon Carved by Flood Runoff. Acts & Facts. 47 (12)

## كوكب مائي بعيد يبدو شاباً

نُشر تحليل جديد يُفصّل غلاف كوكب GJ 1214b، الواقع على بُعد حوالي 40 سنة ضوئية من الأرض، والذي يدرسه الباحثون منذ عام 2009، في عدد مارس من مجلة الفيزياء الفلكية. ووفقًا لعالم مركز هارفارد-سميثسونيان للفيزياء الفلكية والمؤلف الرئيسي للدراسة، زاكوري بيرتا، فإن "كوكب GJ 1214b لا يُشبه أي كوكب نعرفه. فجزء كبير من كتلته يتكون من الماء"[1].

من خلال تحليل حركته وحجمه، تمكن علماء الفلك من حساب كثافة الكوكب. فإذا كان معظمه ماءً، يُفسر ذلك سبب كون كتلته أكبر من كتلة الأرض بسبع مرات فقط، رغم أنه أكبر منها بنحو 2.7 مرة. أما إذا كانت كثافته مماثلة لكثافتها، لكانت كتلته أكبر من كتلة الأرض بعشرين مرة.



رسم توضيحي لعبور النجم GJ 1214 b في الضوء الأزرق. تمثل الكرة الزرقاء النجم المضيف GJ 1214، والكرة السوداء أمامها على اليمين هي GJ 1214 b. حقوق الصورة: NAOJ

استخدم بيرتا وزملاؤه تلسكوب هابل لاستنتاج أن غلاف الكوكب GJ 1214b الجوي أشبه بحمام بخار منه بضباب غباري: "يدور حول نجم قزم أحمر كل 38 ساعة على مسافة 1.3 مليون ميل، مما يُعطيه درجة حرارة تُقدر بـ 450 درجة فهرنهايت". في المقابل، تبعد الأرض عن الشمس حوالي 92 مليون ميل، ويبلغ متوسط درجة حرارة سطحها 57.2 درجة فهرنهايت.

أشارت دراسة أجريت عام ٢٠١١ على غلاف الكوكب GJ 1214b الجوي إلى أنه يدور حول قزم أحمر "ساطع نسبيًا". كم من الوقت سيستغرقه هبوب الرياح الشمسية من نجم ساطع لتبديد بخار الماء من كوكب قريب كهذا؟ وكم من الوقت سيستغرقه حرارة الكوكب الهائلة لقذف بخار الماء من غلافه الجوي إلى الفضاء القريب، خاصةً مع الأخذ في الاعتبار سرعة مداره؟[2].

---

[1] ) Hubble Reveals a New Type of Planet. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics press release, February 21, 2012, reporting on research published in Berta, Z. K. et al. 2012. The Flat Transmission Spectrum of the Super-Earth GJ1214b from Wide Field Camera 3 on the Hubble Space Telescope. The Astrophysical Journal. 747 (1)

[2] ) Kempton, E. M-R., K. Zahnle and J. J. Fortney. 2012. The Atmospheric Chemistry of GJ 1214b: Photochemistry and Clouds. The Astrophysical Journal. 745 (1)

استخدم فريق بحث ياباني من علماء الفلك والكواكب كاميرتي تلسكوب سوبارو البصريتين، وهما كاميرا Suprime-Cam وكاميرا ومطياف الأجسام الخافتة (FOCAS)، مع مرشح نقل أزرق، لرصد عبور الكوكب العملاق GJ 1214 b (Gilese 1214 b) أمام نجمه. درس الفريق ما إذا كان هذا الكوكب يمتلك غلافًا جويًا غنيًا بالماء أو الهيدروجين. أظهرت رصدات سوبارو أن سماء هذا الكوكب لا تُظهر سمة تشتت رايلي قوية، والتي يُتوقع وجودها في غلاف جوي خالٍ من السحب وغني بالهيدروجين. وبالجمع بين هذه النتائج ونتائج الرصدات السابقة بألوان أخرى، تشير هذه النتيجة الرصدية الجديدة إلى أن GJ 1214 b يمتلك على الأرجح غلافًا جويًا غنيًا بالماء.

تُعدّ الكواكب العملاقة الأرضية نوعًا جديدًا من الكواكب الخارجية (أي الكواكب التي تدور حول نجم خارج نظامنا الشمسي)، حيث تتميز بكتلة ونصف قطر أكبر من الأرض، ولكنهما أصغر من الكواكب العملاقة الجليدية في نظامنا الشمسي، مثل أورانوس ونبتون. ولا يزال من غير المعروف ما إذا كانت هذه الكواكب العملاقة الأرضية أقرب إلى "أرض كبيرة" أم إلى "أورانوس صغير"، نظرًا لعدم تمكن العلماء من تحديد خصائصها التفصيلية. وقد ركّز فريق بحثي ياباني حالي، مؤلف من علماء فلك وكوكب، جهوده على دراسة خصائص الغلاف الجوي لأحد هذه الكواكب العملاقة الأرضية، وهو GJ 1214 b، الذي يقع على بُعد 40 سنة ضوئية من الأرض في كوكبة الحواء، شمال غرب مركز مجرتنا درب التبانة. ويُعدّ هذا الكوكب واحدًا من الكواكب العملاقة الأرضية المعروفة التي اكتشفها شاربونو وآخرون (2009) ضمن مشروع MEarth، الذي يركز على إيجاد كواكب صالحة للسكن تدور حول نجوم صغيرة قريبة. قام فريق البحث الحالي بدراسة خصائص تشتت الضوء لعبور النجم GJ 1214 b حول نجمه.

تُمكّن عمليات عبور الكواكب العلماء من دراسة التغيرات في الطول الموجي لسطوع النجم (أي عمق العبور)، مما يدل على التركيب الجوي للكوكب. يُعدّ تشتت رايلي القوي في الطول الموجي المرئي دليلًا قويًا على غلبة الهيدروجين في الغلاف الجوي. يحدث تشتت رايلي عندما تتشتت جزيئات الضوء في وسط ما دون تغيير في الطول الموجي. يعتمد هذا التشتت بشدة على الطول الموجي، ويعزز الأطوال الموجية القصيرة؛ مما يؤدي إلى زيادة عمق العبور في نطاق اللون الأزرق مقارنةً بنطاق اللون الأحمر.

استخدم الفريق الحالي كاميرتي Suprime-Cam وFOCAS البصريتين المثبتتين على تلسكوب سوبارو، والمزودتين بمرشح نقل أزرق، للبحث عن خاصية تشتت رايلي في غلاف كوكب GJ 1214 b الجوي. يُمثل النجم المضيف

الخافت جدًا لهذا النظام الكوكبي، والذي يظهر في الضوء الأزرق، تحديًا للباحثين الساعين لتحديد ما إذا كان غلاف الكوكب الجوي يُظهر تشتت رايلي قويًا أم لا. وقد مكّنت المرآة الكبيرة والقوية لتلسكوب سوبارو، والتي يبلغ قطرها 8.2 متر، الفريق من تحقيق أعلى حساسية على الإطلاق في منطقة الضوء الأزرق.

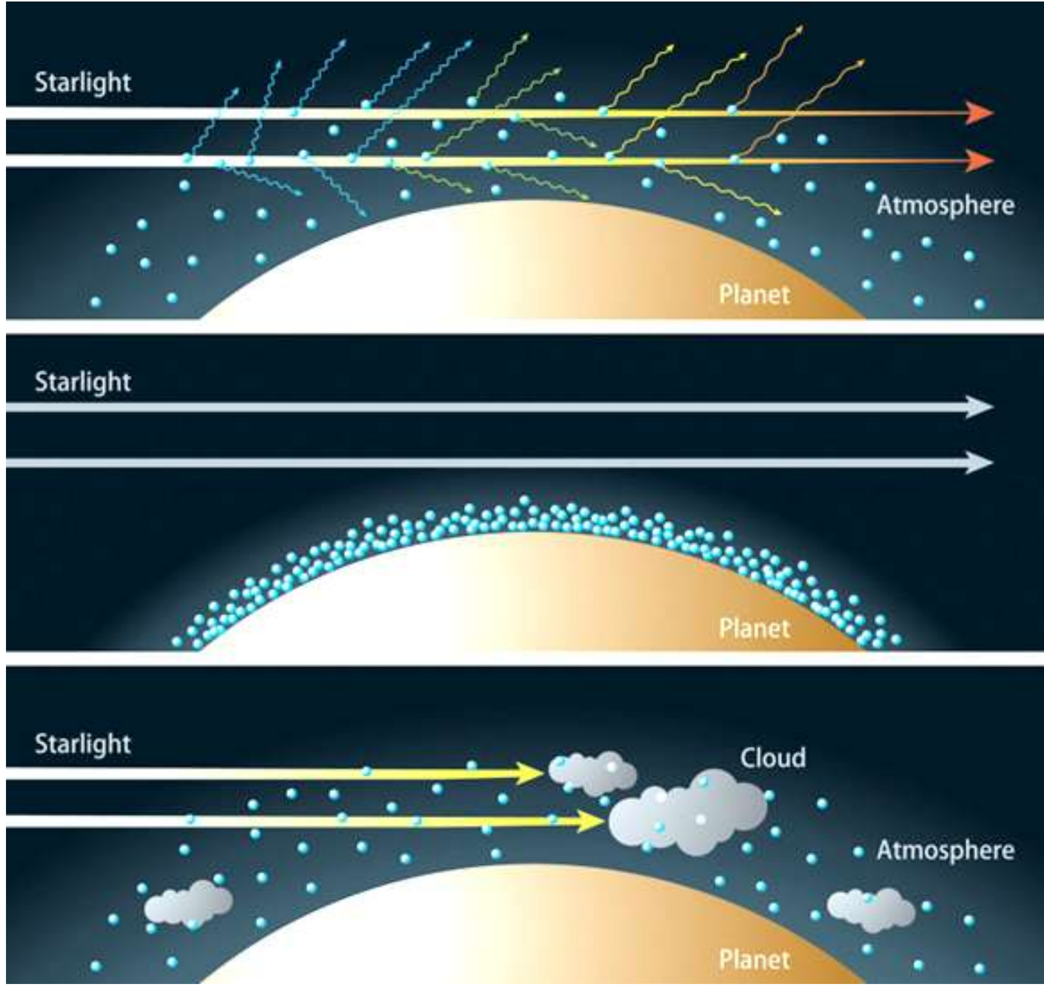
أظهرت ملاحظات الفريق أن غلاف GJ 1214 b الجوي لا يُظهر تشتت رايلي قويًا. تشير هذه النتيجة إلى أن الكوكب يمتلك غلافًا جويًا غنيًا بالماء أو يهيمن عليه الهيدروجين، مع وجود سحب كثيفة.

الرسم التوضيحي يوضح العلاقة بين تركيب الغلاف الجوي وألوان الضوء المنقول.

أعلى: إذا كانت السماء صافية، ذات غلاف جوي ممتد للأعلى، وغني بالهيدروجين، فإن تشتت رايلي يُشتت جزءًا كبيرًا من الضوء الأزرق من الغلاف الجوي للنجم المضيف، بينما يُشتت جزءًا أقل من الضوء الأحمر. ونتيجة لذلك، يكون عبور النجم في الضوء الأزرق أعمق من عبوره في الضوء الأحمر.

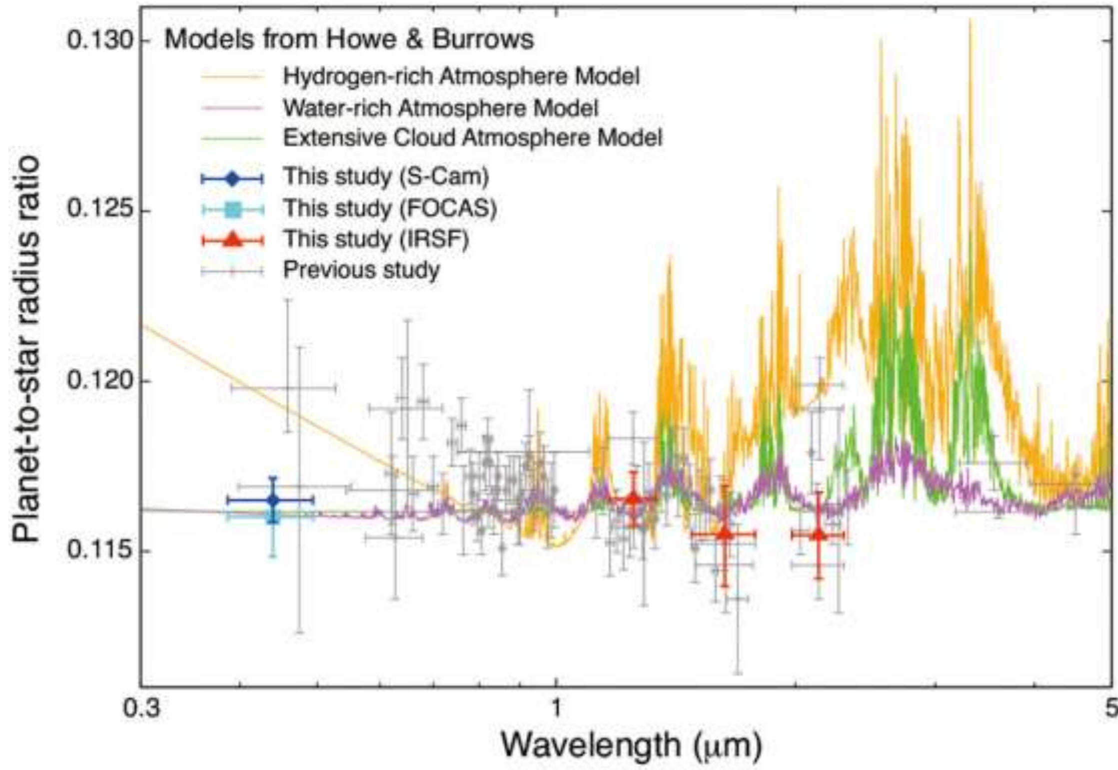
وسط: إذا كانت السماء ذات غلاف جوي أقل امتدادًا وغني بالماء، فإن تأثير تشتت رايلي يكون أضعف بكثير مما هو عليه في الغلاف الجوي الغني بالهيدروجين. في هذه الحالة، يكون لعبور النجوم في جميع الألوان أعماق متقاربة.

أسفل: إذا كانت السماء مليئة بالغيوم، فإن معظم الضوء لا يستطيع المرور عبر الغلاف الجوي، حتى مع غلبة الهيدروجين فيه. ونتيجة لذلك، يكون لعبور النجوم في جميع الألوان أعماق متقاربة. المصدر: المرصد الفلكي الوطني الياباني (NAOJ)




على الرغم من أن الفريق لم يستبعد تمامًا احتمال وجود غلاف جوي غني بالهيدروجين، إلا أن نتائج الرصد الجديدة، بالإضافة إلى نتائج أبحاث سابقة أجريت على ألوان أخرى، تشير إلى أن النجم GJ 1214 b من المرجح أن يكون له غلاف جوي غني بالماء. ويعتزم الفريق إجراء عمليات رصد لاحقة في المستقبل القريب لتعزيز استنتاجهم.

الرسم البيانى أسفل يوضح : أعماق العبور المرصودة والنماذج النظرية للنجم GJ 1214 b. تمثل النقاط الزرقاء والزرقاء السماوية البيانات التي تم الحصول عليها باستخدام كاميرا Suprime-Cam وجهاز FOCAS التابعين لتلسكوب سوبارو، على التوالي (ناريتا وآخرون، 2013). أما النقاط الحمراء، فقد تم الحصول عليها باستخدام تلسكوب IRSF بقطر 1.4 متر الموجود في جنوب إفريقيا (ناريتا وآخرون، 2013). تمثل الخطوط الثلاثة المتصلة (الأصفر والأخضر والبنفسجي) نماذج الغلاف الجوي الغنية بالهيدروجين، والغنية بالماء، والسحابية الواسعة، استنادًا إلى هاو وبوروز (2012). تشير بيانات تلسكوب سوبارو إلى عدم وجود تشتت رايلي قوي في الطول الموجي الأزرق. حقوق الصورة: NAOJ



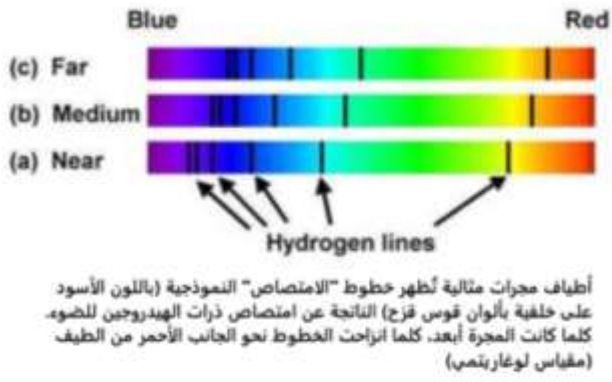

على الرغم من أن عدد الكواكب العملاقة الشبيهة بالأرض التي يمكن للعلماء رصدها في السماء حاليًا قليل، إلا أن هذا الوضع سيتغير جذريًا عندما يبدأ القمر الصناعي "تيس" (TESS) مسحه الشامل للسماء بحثًا عن الكواكب الخارجية الصغيرة العابرة في جوارنا الشمسي. وعندما تتوفر أهداف جديدة، سيتمكن العلماء من دراسة أغلفة العديد من الكواكب العملاقة الشبيهة بالأرض باستخدام تلسكوب سوبارو والتلسكوبات الكبيرة من الجيل التالي، مثل تلسكوب الثلاثين مترًا (TMT). ستتيح هذه الملاحظات للعلماء معرفة المزيد عن طبيعة مختلف الكواكب العملاقة الشبيهة بالأرض[1].

[1] Theoretical Transit Spectra for GJ 1214b and Other 'Super-Earths'" by Alex R. Howe and Adam S. Burrows, 24 August 2012, The Astrophysical Journal

## أدلة على أصل مائي للنظام الشمسي

في يوليو 2005، قامت ناسا بمناورة مذهلة بمركبة فضائية، حيث صدمتها بالمذنب تمبل 1. وكان الهدف من التجربة هو فهم المواد التي يُزعم أن نظامنا الشمسي وكوكبنا والحياة نفسها قد تطورت منها.

بغض النظر عن النزعة التطورية المثيرة للجدل التي رافقت المهمة، فقد حققت نجاحًا باهرًا. اصطدمت قذيفة المركبة الفضائية، وهي عبارة عن رصاصة نحاسية تزن 370 كيلوغرامًا (816 رطلًا)، بسطح المذنب، مُحدثةً سحابةً هائلةً من المقذوفات - سحابة الحطام التي قُذفت إلى الفضاء نتيجةً للاصطدام. رصد علماء الفلك على الأرض الاصطدام، لكن أفضل الصور التُقطت بواسطة المركبة الأم لمهمة "ديب إمباكت" أثناء تحليقها بالقرب من المذنب.



أطياف مجرات مثالية تُظهر خطوط "الامتصاص" النموذجية (باللون الأسود على خلفية بألوان قوس قزح) الناتجة عن امتصاص ذرات الهيدروجين للضوء. كلما كانت المجرة أبعد، كلما انزاحت الخطوط نحو الجانب الأحمر من الطيف (مقياس لوغاريتمي)

كما رُصد الاصطدام بواسطة تلسكوب سبيتزر Spitzer الفضائي، وهو تلسكوب يدور في مدار حول الأرض، قادر على رصد الضوء بأطوال موجية لا يستطيع البشر رؤيتها. وقد مكّن هذا علماء الفلك من تحليل الضوء المنعكس عن الغبار والحطام الذي قذفه الاصطدام، في محاولة لتحديد التركيب الكيميائي والجيولوجي للمذنب.

بينما ستشغل البيانات التي أنتجتها تجربة ديب إمباكت علماء الفلك لسنوات قادمة، فقد أسفرت النتائج الأولية بالفعل عن مفاجآت.

أظهرت لنا العلوم التجريبية أن أنواعًا مختلفة من العناصر والمركبات الكيميائية تُصدر وتمتص الضوء في أجزاء محددة من الطيف الكهرومغناطيسي[1]. يستخدم علماء الفلك تقنية تُعرف باسم التحليل الطيفي لتحليل الضوء المنبعث من النجوم وسحب الغاز في الفضاء، بحثًا عن البصمات الكيميائية المميزة لتكوينها. تظهر هذه البصمات الكيميائية على شكل نطاقات داكنة (خطوط امتصاص) أو نطاقات فاتحة (خطوط انبعاث) في أطياف الجسم المدروس.

---

[1] Williams, A. and Hartnett, J., Dismantling the big bang, Master Books, Arkansas, USA, pp. 38–49, 2005 (

وبالمثل، استخدم العلماء تلسكوب سبيتزر الفضائي لتسجيل التركيب الكيميائي لسحابة المقذوفات المتصاعدة من سطح المذنب Tempel 1's عند اصطدام الجسم به.

اكتشف العلماء بصمات عدد من مكونات باطن المذنب. تشمل هذه المكونات السيليكا، المكون الرئيسي للرمل، والإيثان، وهو غاز يُستخدم على الأرض كوقود ومبرد. كما تم العثور على بصمتين كيميائيتين أخريين، تشيران إلى وجود مركبات كيميائية لم يكن العلماء ليتوقعوها حتى في أحلامهم. هذه المركبات هي الكربونات، الموجودة في أصداف الكائنات البحرية والحجر الجيري، والطين[1].

تكمن المشكلة الكبيرة المحيطة بهذين المركبين في معرفة أن الكربونات والطين لا تتشكل إلا في الماء السائل، وليس في المناطق الجليدية الخارجية للنظام الشمسي حيث يُعتقد أن المذنب Tempel 1 قد نشأ.

لكن السيليكات البلورية الموجودة مع الكربونات والطين تُشكّل بدورها معضلة. لطالما اعتقد علماء الفلك أن المذنبات غنية بالسيليكات[2]. مع ذلك، فإن السيليكات الموجودة في تكوين تمبل 1 بلورية وتتطلب درجات حرارة تتجاوز 700 درجة مئوية (1300 درجة فهرنهايت) لتتشكل. هذه الدرجة، في نظامنا الشمسي، لا توجد إلا بالقرب من الشمس.

بحسب العرف السائد، يُعتقد أن المذنبات، مثل مذنب تمبل 1 ذي الدورة القصيرة، تتشكل بعيدًا عن مدار كوكب نبتون الغازي، حيث تقترب درجات الحرارة باستمرار من الصفر المطلق (-273 درجة مئوية)، وليس بالقرب من الشمس حيث ترتفع درجات الحرارة بشكل حاد. إن وجود مركبات مائية، وسيليكات بلورية، وغاز الإيثان في المذنب نفسه وفي الوقت نفسه يطرح تساؤلات بالغة الصعوبة على علماء التطور. يبدو من المستحيل تصور اجتماع الظروف المختلفة تمامًا اللازمة لتكوينها. يتطلب وجود الماء السائل عددًا من الشروط المحددة للغاية، ليس أقلها نطاق ضيق جدًا من درجات الحرارة والضغط غير موجود في الفضاء بين الكواكب.

أما بالنسبة للمسيحيين، فإن وجود المواد الكيميائية المائية في هيكل تيمبل 1 ليس بالأمر المفاجئ على الإطلاق. في الواقع، يوجد الماء بأشكاله المختلفة بوفرة في الكون. وهذا ما نتوقعه إذا اعتمدنا في بحثنا عن الفهم على روايات الخلق الواردة في الكتاب المقدس، بدلاً من الفرضيات الإلحادية التي تتجاهل السجل الكتابي. في كل من

---

[1] Calvin, W., NASA's Spitzer and deep impact build recipe for comet soup, , 7 September 2005 (

[2] Chang, K., Composition of a comet poses a puzzle for scientists, New York Times 7 September 2005 (

العهد القديم والعهد الجديد، يُذكرنا الكتاب المقدس بأن الماء لعب دورًا هامًا في تكوين نظامنا الشمسي، وربما في تكوين الكون برمته.

يروي سفر التكوين ١: ٢-٧ قصة نشأة الأرض (وربما الكون أيضًا) من الماء (المشار إليه في سفر التكوين ١: ٢ بـ"الغمر"). ورغم أن هذا الأمر يبقى مجرد تكهنات، وليس مذكورًا صراحةً في نص سفر التكوين، فمن الممكن أن يكون الله قد استخدم العمليات نفسها لخلق الكواكب الأخرى في نظامنا الشمسي، وكذلك الكواكب التي قد توجد في أنظمة شمسية أخرى في مجرتنا والكون.

علاوة على ذلك، يستخدم الرسول بطرس في العهد الجديد حقيقة نشأة النظام الشمسي من الماء في سياق نبوي (٢ بطرس ٣: ٥-٧). بل إنه يوبخ أولئك الذين يعارضون الإنجيل والسجل التاريخي للكتب المقدسة عن عمد " 5 لأَنَّ هذَا يَخْفَى عَلَيْهِمْ بِإِرَادَتِهِمْ: أَنَّ السَّمَاوَاتِ كَانَتْ مُنْذُ الْقَدِيمِ، وَالأَرْضَ بِكَلِمَةِ اللهِ قَائِمَةً مِنَ الْمَاءِ وَبِالْمَاءِ، 6 اللَّوَاتِي بِهِنَّ الْعَالَمُ الْكَائِنُ حِينَئِذٍ فَاضَ عَلَيْهِ الْمَاءُ فَهَلَكَ. 7 وَأَمَّا السَّمَاوَاتُ وَالأَرْضُ الْكَائِنَةُ الآنَ، فَهِيَ مَخْزُونَةٌ بِتِلْكَ الْكَلِمَةِ عَيْنِهَا، مَحْفُوظَةً لِلنَّارِ إِلَى يَوْمِ الدِّينِ وَهَلاَكِ النَّاسِ الْفُجَّارِ. "

إنّ سيناريو الخلق الموصوف في سفر التكوين، وعلى لسان بطرس، وإن كان يتوافق مع الأدلة التي نجدها في الكون، إلا أنه يرسم صورةً مناقضةً لتلك التي يصوّرها نموذج الانفجار العظيم. إذ يقول هذا النموذج إنّ الكون لم يبدأ بالماء السائل، بل بانفجارٍ هائل الحرارة. وحتى في النماذج الطبيعية لتكوين الكواكب، تلعب درجات الحرارة المرتفعة للغاية دورًا هامًا في نشأة الكون وتطوره.

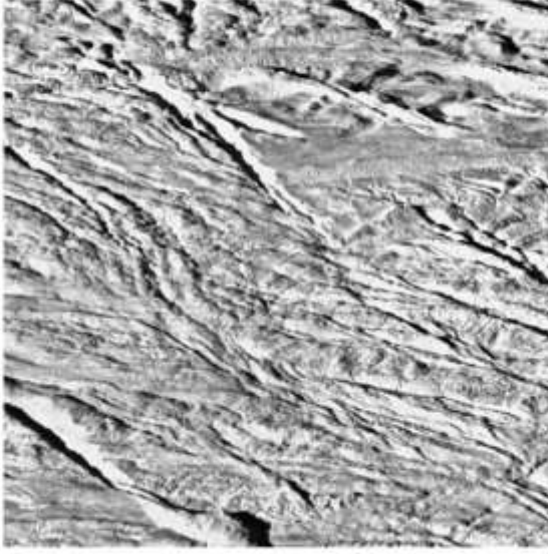
ولا يزال العلماء يتساءلون عن الاكتشافات الشاذة والمتناقضة ظاهريًا في كوننا. وتشمل هذه الاكتشافات ليس فقط مركباتٍ مُكوّنة من الماء في نواة المذنبات، بل أيضًا سحبًا من جليد الماء حول النجوم البعيدة، أو وجود تراكيب مجرية معقدة في الكون البعيد.

يمكن للمسيحيين أن يطمئنوا إلى أن هذه الأدلة تدعم سجل التاريخ الذي أورده الله لنا في كلمته المقدسة. لكن هذه الظواهر تُشكّل إشكاليةً كبيرةً لمن ينكرون وجود الخالق أو دقة كلمته التاريخية.

## تقرير[1] وكالة ناسا

انطلقت مركبة كاسيني Cassini من الأرض في أكتوبر 1997 ودخلت مدار زحل في عام 2004. ولم يمض وقت طويل حتى بدأ إنسيلادوس في تقديم المفاجآت. بدأ مسبار كاسيني دراسة إنسيلادوس Enceladus في فبراير 2005 عندما مرّ على مسافة 1167 كيلومترًا (725 ميلًا) من القمر. رصد مقياس المغناطيسية (MAG) الخاص بالمسبار انحناءً موضعيًا للمجال المغناطيسي لزحل في الفضاء فوق إنسيلادوس، كما لو كان له غلاف جوي.

قال سبيكر Spilker: "كانت خطوط المجال المغناطيسي متباعدة عن سطح إنسيلادوس، كما هو الحال مع المذنبات، ولكن عند القطب الجنوبي تحديدًا". في الوقت نفسه، رصد محلل الغبار الكوني (CDA) التابع للمركبة الفضائية آلاف الجسيمات بحجم الغبار. كما رصدت كاميرات كاسيني معالم خطية بالقرب من القطب الجنوبي بلون مختلف عن بقية السطح الجليدي، مما يشير إلى أنها قد تكون حديثة نسبيًا.



تُظهر هذه الصورة الملتقطة بواسطة مركبة كاسيني الفضائية ما يبدو أنه تضاريس حديثة التكوين جيولوجيًا ومتصدعة تكتونيًا على سطح إنسيلادوس

عندما حلّقت مركبة كاسيني بالقرب من إنسيلادوس للمرة الثانية في الشهر التالي، رصد مقياس المغناطيسية مجدداً تأثير الانحناء، بالإضافة إلى تذبذب في المجال المغناطيسي. تدور جسيمات تُسمى الأيونات - وهي ذرات أو جزيئات تحمل شحنة كهربائية - في مسارات حلزونية حول خطوط المجال المغناطيسي، مما يجعل المجال المغناطيسي يبدو وكأنه يتذبذب. ويُشير تردد هذا التذبذب إلى نوع الجزيء أو الذرة المتأينة المسؤولة عن هذا التذبذب. في هذه الحالة، يُشير التذبذب إلى وجود جزيئات ماء متأينة.

كان من المفترض أن تُقرّب مركبة كاسيني القمر من سطح إنسيلادوس في تحليقها التالي في يوليو 2005، لمسافة 1000 كيلومتر (625 ميلاً). لكنّ قياسات مقياس المغناطيسية أثارت فضول العلماء، على أقل تقدير. أرادوا رؤية أقرب، أقرب بمسافة 800 كيلومتر (500 ميل). قام ملاحو المهمة بتعديل مسار رحلة كاسيني بحيث مر

[1] ( 12 April 2017 , https://science.nasa.gov/missions/cassini/the-moon-with-the-plume

المسبار بالقرب من إنسيلادوس في 14 يوليو، على بعد 109 أميال (175 كيلومترًا) فقط فوق سطح القمر - أقرب من أي مركبة فضائية وصلت إليها على الإطلاق.

عرف العلماء من خلال مهمة فوياجر أن سطح إنسيلادوس يحتوي على عدد قليل نسبيًا من الفوهات، لكن كاسيني اكتشفت أن سطحه حول القطب الجنوبي يكاد يخلو من الفوهات. وقال كابل: "كان هذا الأمر بالغ الأهمية لأن فوهات الاصطدام تُعدّ مؤشرًا ممتازًا على عمر الأشياء. فكلما زاد عدد الفوهات، دلّ ذلك على قدم الشيء، وكلما قلّ عددها، دلّ ذلك على حداثته".

من المفترض أن صخورًا فضائية قد اصطدمت بإنسيلادوس في الماضي، فمعظم أقمار زحل مليئة بالفوهات. وقال كابل: "لكن في إنسيلادوس، طرأت عوامل أخرى ومحت هذه الفوهات، سواءً أكان ذلك نتيجة انصهار مواد وملء الفوهات، أو نتيجة تغطية تلك الفوهات نفسها. لذا، فإن سطح إنسيلادوس حديث التكوين".

التقطت كاميرات التصوير التابعة لمسبار كاسيني صورًا لعدد لا يحصى من الصخور الجليدية بحجم المنازل، والتي يبدو أنها وُضعت هناك بفعل النشاط في الغلاف الجليدي للقمر. وتتقاطع الصدوع والتلال على سطح الجليد. ويبدو أن كل شيء يشير إلى أن المنطقة القطبية الجنوبية هي المنطقة ذات السطح الأكثر حداثة على إنسيلادوس.

كما اكتشف علماء كاسيني ما بدا أنه سحابة كثيفة بشكلٍ مثير للدهشة من بخار الماء وحبيبات الجليد فوق القطب الجنوبي، وساعدت هذه الرحلة العلماء على تأكيد شكوكهم السابقة بأن إنسيلادوس هو المصدر الرئيسي لمواد حلقة E لكوكب زحل. لكن درجات الحرارة التي رصدوها كانت العامل الحاسم.



يُظهر هذا الرسم التوضيحي تحليق مركبة كاسيني فوق عمود الدخان الناتج عن إنسيلادوس في أكتوبر 2015

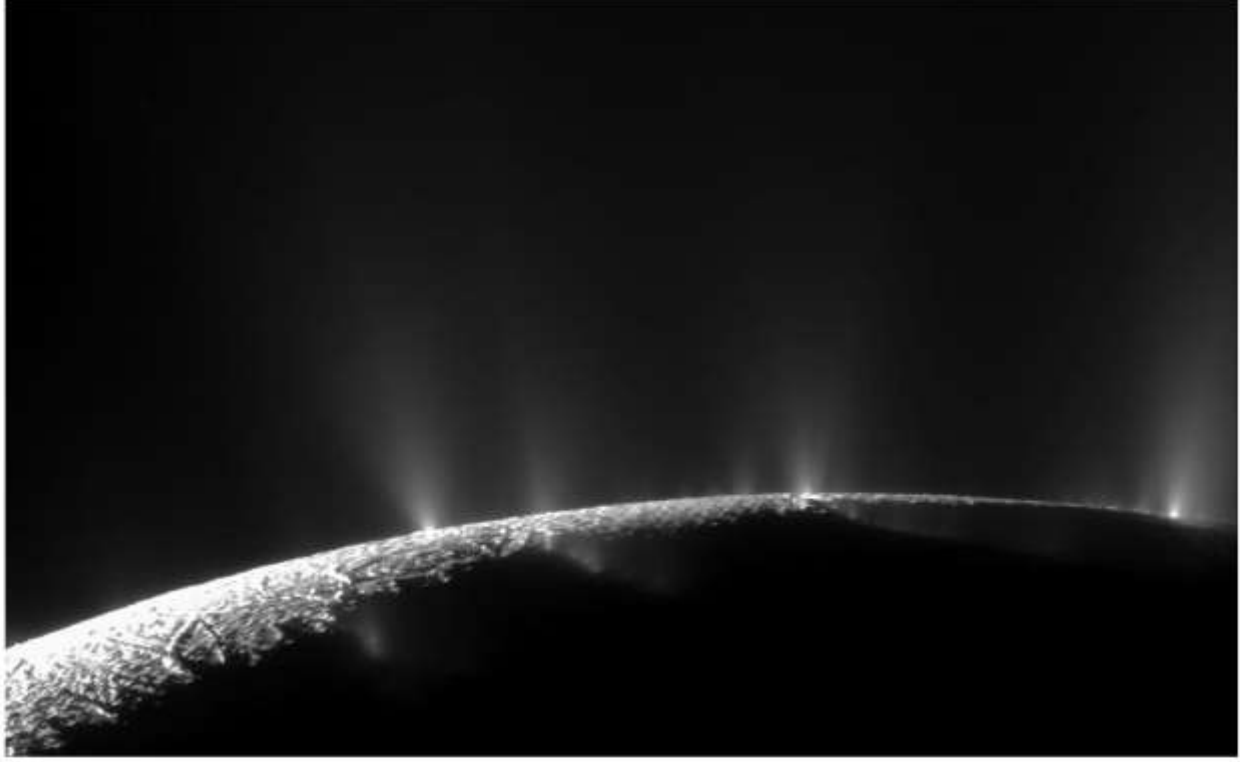
عند خط استوائه، الذي يتلقى أكبر قدر من أشعة الشمس المباشرة، يبلغ متوسط درجة حرارة سطح إنسيلادوس -316 درجة فهرنهايت (-193 درجة مئوية). من المفترض أن يكون القطب الجنوبي أبرد نظرًا لتلقيه كمية أقل من أشعة الشمس. مع ذلك، كان متوسط درجة الحرارة هناك أعلى بقليل من خط الاستواء، حيث بلغ -307 درجة فهرنهايت (-188 درجة مئوية). أما الشقوق الخطية هناك، والتي تُعرف الآن باسم "خطوط النمر"، فقد وصلت درجة حرارتها إلى -261 درجة فهرنهايت (-163 درجة مئوية) في بعض الأماكن، أي أعلى بـ 70 درجة من خط الاستواء. من الواضح أن إنسيلادوس لم يكن كوكبًا ميتًا، بل كان نشطًا.

اعتقد العلماء أن سحابة الماء فوق إنسيلادوس قد تكون ناتجة عن تبخر الماء من الشقوق عبر عملية سطحية مشابهة لما يحدث على المذنبات. لكن بدلاً من ضوء الشمس، الذي يُوفّر الحرارة اللازمة لتبخر الماء من المذنبات، ظلّ مصدر الحرارة الذي يُشغّل عملية التبخر على إنسيلادوس مجهولاً. ربما كان الاحتكاك المدّي أو النشاط الإشعاعي، بدلاً من ضوء الشمس، يُوفّر الحرارة اللازمة لتحويل جليد الماء إلى غاز. على أي حال، لم تدم فكرة المذنب.

بحلول مارس 2006، أظهرت صور المركبة الفضائية كميات هائلة من المواد تتساقط من القمر، وبسرعة فائقة. استبعد علماء كاسيني فرضية المذنب.

وجد العلماء أن الماء لم يكن يتحول على السطح مباشرةً من جليد دافئ إلى غاز. بل بدا من المرجح أن إنسيلادوس كان دافئًا بما يكفي لتكوين خزانات صغيرة من الماء السائل على عمق بضعة أقدام تحت سطح القمر. وكان

بإمكان الماء أن يندفع عبر الشقوق ويتناثر كالينابيع الحارة، مكونًا ما يُعرف الآن باسم "عمود الماء" فوق القطب الجنوبي للقمر. لكن وجود الماء السائل بالقرب من السطح سيكون اكتشافاً استثنائياً. فمن غير المعقول أن يحتوي قمر صغير جداً وبعيد جداً عن الشمس على الماء السائل.



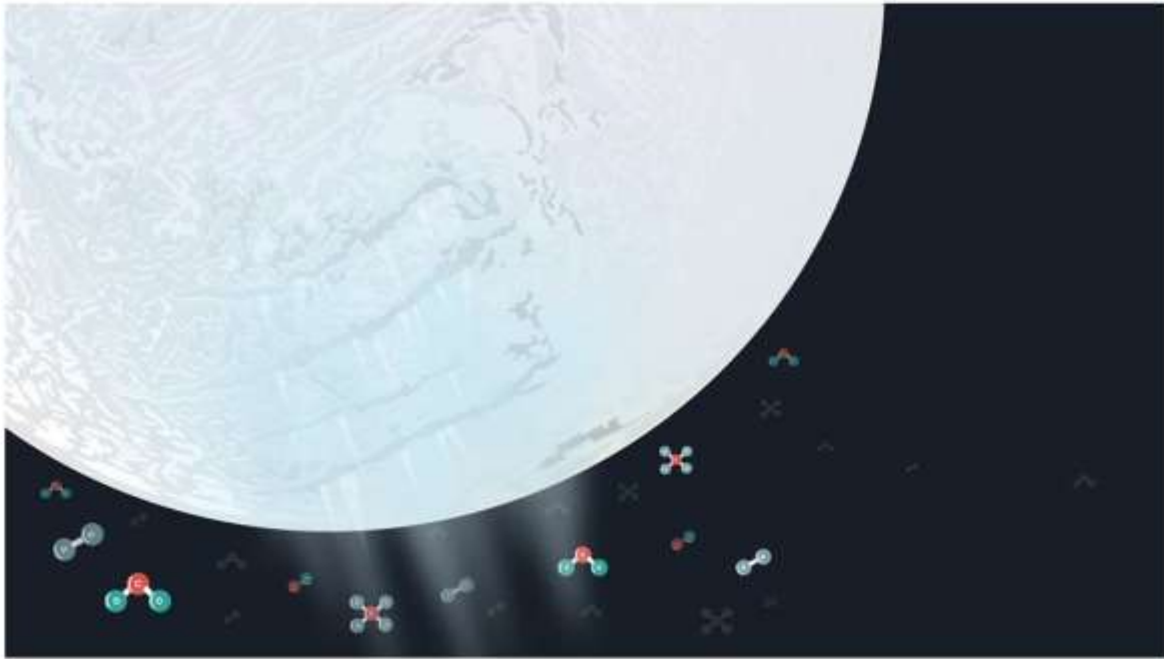
صورة ملتقطة بواسطة مركبة كاسيني. يُضيء ضوء الشمس الخلفي بشكلٍ مذهل نفاثات الجليد المائي على سطح إنسيلادوس

كانت فكرة الخزانات القريبة من السطح مجرد "تخمين"، لكنها لم تكن قاطعة بأي حال من الأحوال، ولم يتمكن العلماء من إجراء المزيد من الملاحظات الدقيقة على إنسيلادوس لفترة من الوقت. وكما كان مخططًا له، كان مدار كاسيني يتغير، ولن يحمل المركبة الفضائية بالقرب من إنسيلادوس مرة أخرى حتى عام 2008.

لكن علماء كاسيني بات لديهم الآن بياناتٌ كافيةٌ لتحليلها بدقةٍ من ثلاث تحليقاتٍ قريبة. لذا، قام فريق التصوير التابع للمهمة بتحليل صورٍ التُقطت على مدار عامين، وقارنوها ببيانات درجة حرارة السطح من مطياف الأشعة تحت الحمراء الخاص بالمركبة الفضائية. واستخدم العلماء صورًا لقمر إنسيلادوس التُقطت عندما كانت كاسيني في مواقع مختلفة حول القمر لتحديد مواقع النفاثات بدقةٍ أكبر. في أكتوبر 2007 أعلنوا أن جميع النفاثات تقريبًا تأتي من الصدوع الأربعة ذات الخطوط النمرية، وأن جميعها تقريبًا تأتي من أماكن قاسها مطياف الأشعة تحت الحمراء على أنها الأكثر دفئًا.

لم يتبق سوى تحليق واحد إضافي بالقرب من إنسيلادوس في المهمة الأساسية التي تستغرق أربع سنوات. ثم، في أبريل 2008، مددت وكالة ناسا مهمة كاسيني لمدة عامين، حيث أصبح إنسيلادوس أحد الأهداف ذات الأولوية القصوى. ثم مددت ناسا المهمة مرة ثانية حتى عام 2017. وبذلك، أتاحت هذه التمديدات للعلماء فرصة القيام بـ 23 تحليقًا مُستهدفًا فوق إنسيلادوس، بدلًا من التحليق الأربع الأصلي.

وبذلك، بدأت صفحات قصة إنسيلادوس تتراكم بشكل مغامر. في مارس 2008، قامت مركبة كاسيني الفضائية بالتحليق لدراسة المواد المنبعثة من النفاثات. حلقت المركبة الفضائية مباشرة عبر عمود الدخان على ارتفاع 120 ميلاً (200 كيلومتر). سمحت بيانات الأجهزة لعلماء كاسيني بتحديد أن الماء ومواد أخرى كانت تندفع من سطح القمر بسرعة تقارب 1300 كيلومتر في الساعة. وقد حلل مطياف الكتلة الأيوني والمحايد (INMS) الجسيمات والغازات في عمود الدخان، الذي احتوى على بخار الماء، بالإضافة إلى ثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون ومواد عضوية، وكلها بكثافات أعلى بكثير مما توقعه العلماء.



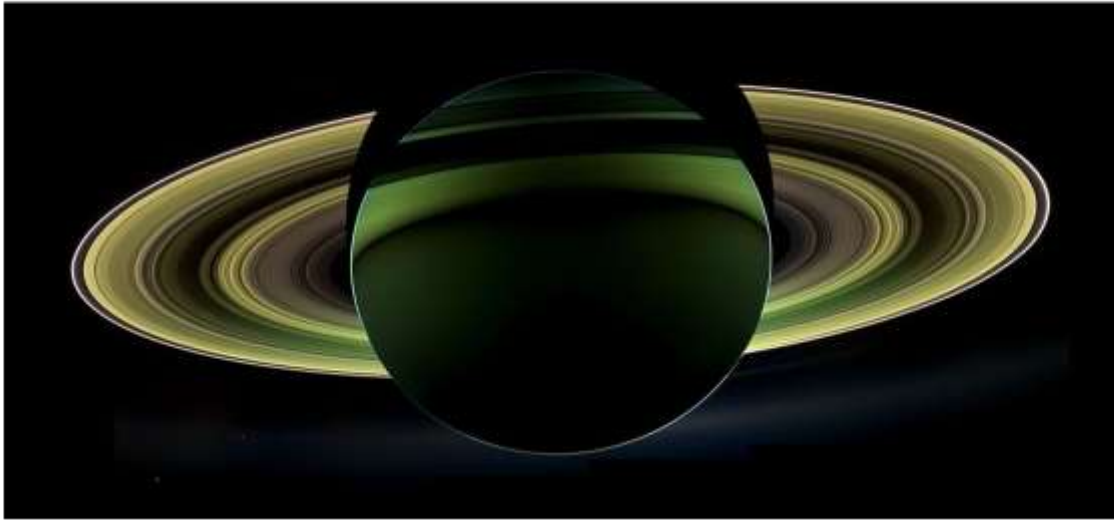
تم رصد مركبات عضوية - وهي اللبنات الأساسية للحياة على الأرض - إلى جانب غازات متطايرة وبخار الماء وثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون والأملاح والسيليكا في عمود الدخان المنبعث من إنسيلادوس

خلال التحليق، أنشأ جهاز CIRS خرائط حرارية جديدة عالية الدقة للقطب الجنوبي، ووجد أن الشقوق المخططة، من طرف إلى آخر تقريبًا، أكثر دفئًا من السطح المحيط بها. ووجد المطياف أن درجة حرارة السطح في بعض الأماكن بلغت -135 درجة فهرنهايت (-93 درجة مئوية)، أي أعلى مما تم قياسه سابقًا.

بعد بضعة أشهر فقط، في أغسطس، حلقت مركبة كاسيني بالقرب من إنسيلادوس بسرعة 40,000 ميل في الساعة (64,000 كيلومتر في الساعة)، والتقطت صورًا سريعة لسطح القمر لتحديد مواقع انطلاق النفاثات على طول الشقوق المخططة. بل وسمحت الكاميرا للعلماء بقياس الشكل الداخلي للشقوق، والتي يبدو أنها بعمق حوالي 980 قدمًا (300 متر) بجدران داخلية على شكل حرف V.

على مدى السنوات الثلاث التالية تقريبًا، بدأ الباحثون في تجميع المزيد من المعلومات من خلال تحليقات إضافية بالقرب من القمر الصغير، ودمج الملاحظات التي جمعوها في تحليقات سابقة.

في يونيو ، أعلن العلماء العاملون على جهاز تحليل الغبار الكوني التابع لمسبار كاسيني أنهم عثروا على ملح في حبيبات الجليد التي تدور في الحلقة E لكوكب زحل، وهي الحلقة الخارجية الشاسعة التي تشكلت بفعل مواد معروفة الآن بأنها تندفع من قمر إنسيلادوس.



التقطت مركبة كاسيني الفضائية التابعة لناسا هذه الصورة لكوكب زحل وحلقاته، بينما كانت المركبة الفضائية في ظل زحل

لا شيء سوى الماء السائل قادر على إذابة كمية كافية من المواد لجعل جزيئات الجليد بهذه الملوحة. كما أنه، إذا كان عمود الدخان ناتجًا عن تبخر الماء، فلن يكون قادرًا على حمل الملح معه، وفقًا لسبيلكر. يقول: "لرفع

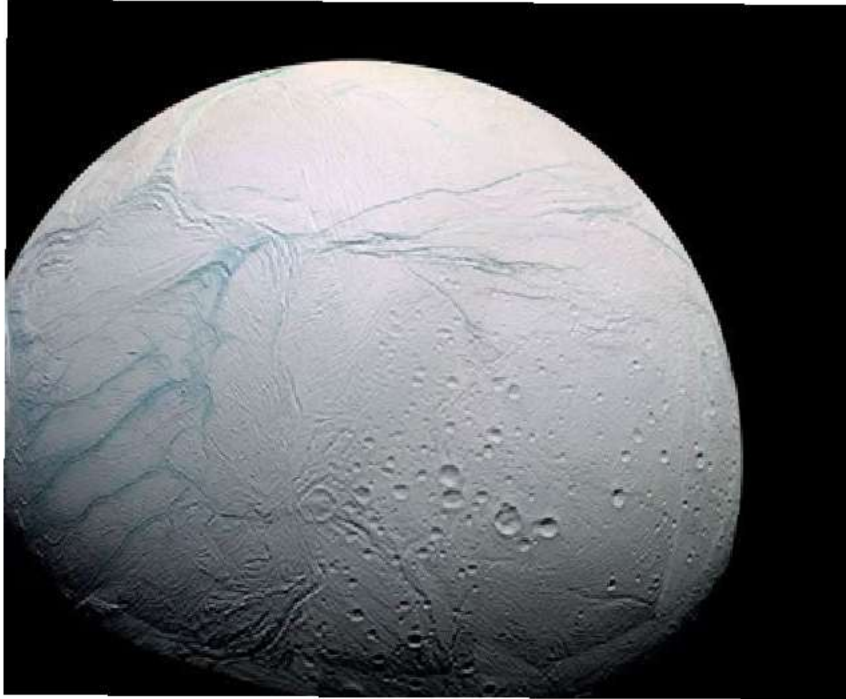
جزيئات الملح، نحتاج في الواقع إلى قطرات ماء صغيرة جدًا لحملها. لو أخذنا الماء الذي تحول من الحالة السائلة إلى البخار، لترك الملح خلفه".

ثم يتراكم الملح على السطح كما يحدث في المسطحات الملحية. ويضيف سبيلكر: "لذا، لنقل جزيئات الصوديوم والبوتاسيوم إلى عمود الدخان، كان لا بد من وجود رذاذ يتجمد ويتصاعد من النفاثات. كنا نحتاج، على الأقل تحت القطب الجنوبي، إلى ماء سائل".

بدأ النقاش حول إنسيلادوس يتحول من خزانات المياه الجوفية إلى احتمال وجود محيط مالح جوفي.

في الشهر التالي، أفاد علماء يستخدمون جهاز مطياف الكتلة الأيوني (INMS) على متن مركبة كاسيني لدراسة عمود الدخان المنبعث من إنسيلادوس، أنهم وجدوا دليلًا قاطعًا على وجود الأمونيا، وهو ما يُعد دليلًا إضافيًا على وجود الماء السائل.

أتاح تحليق المركبة الفضائية كاسيني في نوفمبر 2009 لفريقها الحصول على أفضل صورة ثلاثية الأبعاد على الإطلاق لخطوط النمر، بالإضافة إلى اكتشاف نفاثات مائية جديدة وتغيرات في نشاط بعض النفاثات المعروفة.



تظهر خطوط tiger على سطح إنسيلادوس باللون الأزرق

ثم ظهر لغز جديد في أكتوبر 2010. كان علماء كاسيني قد حسبوا كيف سيُحدث مدار إنسيلادوس حول زحل إجهادًا مدّيًا في قشرة هذا القمر الصغير. ولكن عندما رسموا خرائط للأماكن التي من المفترض أن يتعرض فيها إنسيلادوس لأكبر قدر من الإجهاد وقارنوها بالمناطق الدافئة التي رسمها مطياف الأشعة تحت الحمراء، لم تتطابق النتائج. اعتقد الباحثون أن هذا التناقض يمكن تفسيره، ولكن فقط إذا كان القمر يتذبذب أثناء دورانه - وهو احتمال غريب.

في يونيو 2011، أدرك العلماء أن إنسيلادوس لا يكتفي بضخ الماء إلى حلقة E حول زحل، بل يُنتج أيضًا حلقة ضخمة ممتدة - على شكل كعكة - من المواد المقذوفة حول زحل. اكتشف مرصد هيرشل الفضائي التابع لوكالة الفضاء الأوروبية هذه الحلقة الجليدية، التي يسقط جزء صغير منها في نهاية المطاف في الغلاف الجوي العلوي لزحل.

يمتلك زحل سحبًا مائية خاصة به، لكن الماء لا يصل إلى ارتفاعات عالية في غلافه الجوي كما يفعل إنسيلادوس، مما يجعل إنسيلادوس الجليدي الصغير القمر الوحيد في المجموعة الشمسية المعروف بتأثيره على التركيب الكيميائي لكوكبه الأم.

خلال عامي 2012 و2013، اكتشف علماء كاسيني بشكل متزايد علاقة بين الإجهاد الجاذبي والتغيرات في نفاثات إنسيلادوس. ومثل جميع الكواكب والأقمار في المجموعة الشمسية، لا يدور إنسيلادوس في مدار دائري كامل. مساره بيضاوي الشكل، ويتسبب الضغط الجاذبي الناتج عن قربه من زحل وابتعاده عنه أحيانًا في انفتاح وانغلاق الشقوق الموجودة في خطوطه الشبيهة بخطوط النمر أثناء دورانه حول كوكبه.

في هذه المرحلة، كان بعض العلماء على الأقل يفكرون بجدية في احتمال وجود محيط إقليمي، أو حتى محيط عالمي، على سطح إنسيلادوس، ويعود ذلك جزئيًا إلى أن الغلاف الجليدي الذي يغطيه يحتاج إلى محيط تحته لكي ينثني بهذا القدر. وسرعان ما عززت التجارب الجاذبية هذا التصور.

أعلن علماء الراديو التابعون لمسبار كاسيني في أبريل 2014 أنهم رصدوا، خلال ثلاث تحليقات فوق إنسيلادوس بين عامي 2010 و2012، انزياحًا دوبلريًا في الإشارات الراديوية الصادرة من كاسيني، يتوافق مع وجود محيط على عمق حوالي 10 كيلومترات تحت غلاف جليدي يتراوح سمكه بين 30 و40 كيلومترًا.

ثم، في يوليو 2014، أفاد علماء كاسيني، بعد تحليل بيانات صورية مُجمّعة على مدى سنوات من جهاز CIRS، بالإضافة إلى رصد حديث من مطياف رسم الخرائط المرئية والأشعة تحت الحمراء (VIMS) التابع لكاسيني، أنهم توصلوا إلى أن "البؤر الساخنة" المحيطة بالينابيع الحارة أو النفاثات على سطح إنسيلادوس كانت شديدة التمركز. وأشارت الصور عالية الدقة إلى أن قطر هذه البؤر الساخنة لا يتجاوز بضعة عشرات من الأمتار، وتتمركز حول كل نفاثة. ولو كانت هذه النفاثات مدفوعة بالحرارة الناتجة عن احتكاك المد والجزر في الغلاف الجليدي للقمر، لكانت البؤر الساخنة أكبر حجمًا.

هذا يعني أن البؤر الساخنة، بدلًا من أن تكون سببًا في تكوّن النفاثات، كانت نتاجًا لها. إذ كان الماء السائل الدافئ يصعد عبر الشقوق، ويُرسب جزءًا من حرارته في الجليد السطحي أثناء اندفاعه إلى الفضاء. وخلص العلماء إلى أن محيطًا جوفيًا هو المصدر الوحيد المحتمل للماء في هذه النفاثات. كان وجود محيط هو السيناريو الوحيد المنطقي، استنادًا إلى بيانات كاسيني.

ثم بدأت فكرةٌ لافتةٌ بالتبلور في أوائل عام ٢٠١٥. أشارت الأدلة إلى احتمال وجود نشاط حراري مائي على إنسيلادوس، مما يجعله المكان الوحيد خارج الأرض الذي ثبت وجود مثل هذه الظروف فيه. وقد يعني هذا أيضًا أن إنسيلادوس أكثر ملاءمةً للحياة مما كان يُعتقد سابقًا. وتتلخص الآلية في أن مياه البحر تتسرب إلى أعماق قاع المحيط حيث تسخن وتتفاعل مع المعادن الموجودة في القشرة الصخرية. وعندما تخرج المياه من قاع المحيط، تحمل معها المعادن الذائبة، وتشكل، على الأرض على الأقل، أساسًا لنظام بيئي غني.

في إنسيلادوس، يعتقد العلماء أن المياه الساخنة المحتوية على السيليكا الذائبة تتدفق إلى المياه الباردة في المحيط الجوفي. تبرد السيليكا بسرعة في المياه الباردة، مُشكّلةً بلوراتٍ تُحمل إلى الأعلى، ثم تخرج في النهاية عبر شقوق في القشرة إلى الفضاء. توصل العلماء إلى هذه النتيجة بعد تحليل بيانات سنوات من محلل الغبار الكوني التابع لمسبار كاسيني، والذي رصد مرارًا وتكرارًا جزيئات دقيقة غنية بالسيليكا.

وفي سياق منفصل، كان فريق من العلماء يحاول معرفة سبب غنى عمود الدخان المنبعث من إنسيلادوس بالميثان، وخلص إلى أن النشاط الحراري المائي هو أحد التفسيرات الأكثر ترجيحًا.

ازدادت قصة إنسيلادوس غرابةً في خريف عام ٢٠١٥. كان وجود محيط من الماء السائل تحت سطح قمر صغير وبعيد عن الشمس أمرًا لافتًا، لكن علماء كاسيني كانوا قد بدأوا يميلون إلى هذه الفكرة. كان يُعتقد أن المحيط

عدسي الشكل وكبير نسبيًا. أشارت قياسات الجاذبية من بعض تحليقات كاسيني القريبة من المنطقة القطبية الجنوبية إلى أن المحيط قد يكون عالميًا، لكن لم يكن لدى العلماء أدلة أخرى كافية تدعم هذا الاعتقاد. تغير هذا الوضع مع نشر ورقة بحثية في سبتمبر من ذلك العام.

كان الباحثون يرسمون بدقة مواقع المعالم على سطح إنسيلادوس باستخدام مئات الصور من أكثر من سبع سنوات من مهمة كاسيني. تتبعوا الفوهات لقياس دوران القمر حول محوره بدقة، ووجدوا أن إنسيلادوس يتذبذب أثناء دورانه. إنسيلادوس مقيد مدّيًا بزحل، ما يعني أن نفس الجانب من القمر يواجه الكوكب دائمًا. هذا يعني أن القمر يدور حول محوره بنفس سرعة دورانه حول زحل. التذبذب، أو التمايل، هو حركة من اليسار إلى اليمين. إنها حركة دقيقة، أشبه برأس رامي البيسبول وهو يشير بـ"لا" إلى الماسك خلف لوحة القاعدة الرئيسية عند اختيار رمية الكرة.

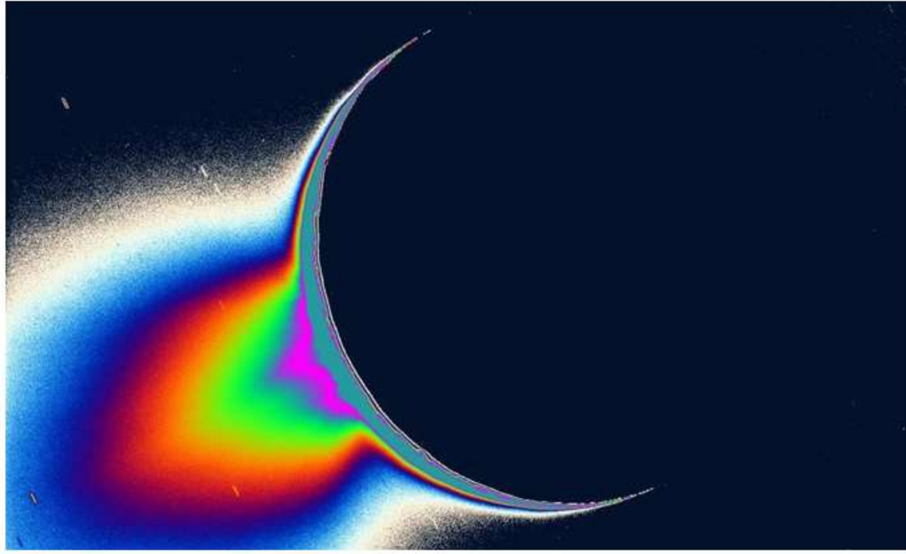
قال سبيكر: "يُخبرنا مقدار التمايل ما إذا كان الجسم صلبًا أم أن قشرته تطفو على سطح محيط كسائل مُزلق". كان تمايلًا طفيفًا بالنسبة لإنسيلادوس، لكنه كان اكتشافًا هائلًا لعلماء كاسيني. استنادًا إلى هذا التمايل، ابتكر الباحثون نماذج لكيفية تكوين إنسيلادوس من الداخل. النموذج الوحيد المتوافق هو وجود طبقة سائلة تفصل تمامًا اللب الصخري المسامي عن القشرة الجليدية. ببساطة، لا يمكن لإنسيلادوس أن يتمايل بهذا القدر إذا كانت القشرة واللب متصلين اتصالًا صلبًا. وهكذا تلاءمت القطع. كان لإنسيلادوس محيط عالمي.

قال ستيف فانس، عالم الأحياء الفلكية الذي يدرس عوالم المحيطات في مختبر الدفع النفاث: "هذا يجعل إنسيلادوس أكثر إثارة للاهتمام بالنسبة لي". فانس عالمٌ ضمن فريق مهمة ناسا القادمة "يوروبا كليبر" إلى يوروبا، أحد أكبر أقمار المشتري، والذي يُعتقد، مثله مثل إنسيلادوس، أنه يمتلك محيطًا جوفيًا عالميًا من الماء السائل. يقول فانس: "وجود محيط عالمي يجعل إنسيلادوس أقرب إلى يوروبا، وأقرب إلى الأرض". وإذا اقتصر هذا المحيط على منطقة القطب الجنوبي لإنسيلادوس، فقد يكون مؤقتًا، وربما يكون ناتجًا عن اصطدام نيزك. ويضيف فانس: "كونه محيطًا عالميًا يعني أنه بيئة مستقرة وطويلة الأمد".

وهذه البيئة طويلة الأمد ستمنح الحياة وقتًا أطول لتستقر. وخلال المهمة، رصدت الأجهزة في عمود إنسيلادوس جزيئات عضوية ونيتروجينية مثل الأسيتيلين والأمونيا وثاني أكسيد الكربون والميثان. كما أن حبيبات السيليكا

في العمود بحجم يُرجح أنها تشكلت في الفتحات الحرارية المائية التي تُشكل، على الأرض، أساس النظم البيئية الغنية.

في يونيو 2023، وباستخدام البيانات التي جمعتها مهمة كاسيني، اكتشف فريق دولي من العلماء الفوسفور - وهو عنصر كيميائي أساسي للحياة - محتجزًا داخل حبيبات جليدية غنية بالملح قُذفت إلى الفضاء من إنسيلادوس. يصف سبيكر إنجاز إنسيلادوس بأنه قصة بوليسية رائعة. "لقد تضافرت جهود جميع الأجهزة على متن كاسيني لحل اللغز ومساعدتنا على فهم ما نعرفه اليوم عن إنسيلادوس. لقد تطلب الأمر تضافر جهود الفريق بأكمله." وأضاف سبيكر أن اكتشافات كاسيني في إنسيلادوس أدت إلى ظهور طريقة جديدة للنظر في "المناطق الصالحة للسكن" المحتملة للباحثين عن حياة خارج كوكب الأرض. "لقد وسّعت آفاقنا حقًا، وغيّرت تفكيرنا تمامًا، وأحدثت ثورة في نظرتنا إلى أماكن وجود الحياة في النظام الشمسي وخارجه. إنه عالم محيطي."



**أرسلت مهمة كاسيني-هويجنز Cassini-Huygens إلى زحل هذه الصور المذهلة لأقرب أقماره، إنسيلادوس. تُظهر الصورة التحليل الطيفي نافورة من الماء تندفع من السطح وتمتد لمئات الكيلومترات في الفضاء. تُثبت هذه الاكتشافات وغيرها وفرة الماء في الفضاء.**

## كان قمرنا رطباً عندما تشكل

توصل علماء من جامعة ميشيغان إلى اكتشاف هام، إذ عثروا على كميات كبيرة من الماء في صخور مستخرجة من أعماق باطن القمر. يرتبط هذا الماء كيميائيًا داخل صخور القمر[1].

تقول النظرية العلمانية السائدة اليوم إن القمر تشكّل قبل نحو 4.5 مليار سنة من مواد منصهرة قذفتها الأرض الوليدة نتيجة اصطدامها بجسم بحجم المريخ. ثمّ تجمّعت هذه المواد المنصهرة شديدة الحرارة لتُشكّل قمرنا.

استنادًا إلى تلك النظرية، توقع العلماء العلمانيون أن أي ماء كان موجودًا خلال المرحلة المبكرة المنصهرة للقمر كان سيتبخر في الفضاء، تاركًا القمر وصخوره جافة تمامًا. هذا ما توقعوا العثور عليه، واعتقدوا لسنوات عديدة أن تحليل عينات الصخور التي جُلبت من مهمات أبولو إلى القمر قد أكد ذلك. لكن الحقيقة الآن هي عكس ذلك تمامًا. فقد جُمعت تدفقات بركانية من أعماق وشاح القمر، كانت قد بردت على السطح، خلال عمليات الهبوط على سطح القمر في الفترة من 1969 إلى 1972. وقد أُعيد تحليل عينات الصخور هذه مؤخرًا.

جاء اكتشاف الماء بعد أن بدأت أدلة متضافرة في السنوات الأخيرة تدعم فكرة وجود قمر "رطب". قرر العلماء مؤخرًا إعادة فحص عينات صخور القمر من مهمة أبولو، هذه المرة بدقة أكبر. استخدموا تقنيات تحليلية أكثر تطورًا، وكشفوا عن تركيزات كبيرة من الماء داخل حبيبات زجاجية بركانية دقيقة. والمثير للدهشة أن علماء السبعينيات الذين حللوا العينات لأول مرة لم يعثروا على أي ماء، أو إن وجدوه فقد افترضوا أنه ناتج عن تلوث بعد عودة الصخور إلى الأرض. افترضوا أن نظرية القمر الجاف قد تأكدت. يبقى غير واضح إلى أي مدى أثرت أفكارهم المسبقة على أساليب تحليلهم وعمق بحثهم العلمي. هل لم يكلف العلماء أنفسهم عناء تحليل صخور القمر من مهمة أبولو بدقة بحثًا عن أي دلائل على وجود الماء لاعتقادهم بعدم وجوده؟ إذا كان الأمر كذلك، فسيكون هذا مثالًا آخر على أن افتراضات العمر الطويل/التطورية تُبطئ تقدم المعرفة العلمية. أثار هذا الاكتشاف الجديد فضول الجيولوجيين، إذ أن الصخرة من نوع الفلسبار، المعروف تقليديًا بجفافه الكيميائي الشديد، حيث لا يُفترض وجود أي ماء فيها. وقد أثار هذا الاكتشاف حيرة علماء الكواكب، الذين وصفوا تكوين القمر بأنه "لغز"[2]. فلم يُعثر على الماء في باطن القمر فحسب، بل عثرت المجسات التي أُرسلت إليه في السنوات

---

[1] Erickson, J., Water on the moon: it’s been there all along, ns.umich.edu, accessed 31 May 2013

[2] Khan, A., New look at Apollo moon rocks reveals signs of ‘native’ water, Los Angeles Times articles.latimes.com, accessed 31 May 2013

الأخيرة على كميات كبيرة من الماء على سطحه. ويُعتقد أن إحدى الفوهات تحتوي على ما يصل إلى مليار جالون من جليد الماء. وقد علّق عالم الكواكب بول جي. لوسي قائلاً إنه "مذهول تمامًا" بهذه النتائج الجديدة. ويرى بعض العلماء أن الماء السطحي ربما يكون قد نتج عن اصطدامات نيازك، لكنهم يُقرّون بأنه لا توجد آلية معروفة تُفسّر وجود الماء في باطن القمر، والذي، من الناحية الكيميائية، لا بد أنه كان موجودًا "منذ البداية"[1]. يُسلّم العلماء الآن بوجود كميات هائلة من الماء في اللحظات الأولى لتكوّن القمر. فمن المؤكد أن المادة التي تكوّن منها كانت رطبةً عند بدء تشكّله. كمية الماء هائلة، إذ تحتوي صخور القمر على كمية من الماء تُعادل تلك الموجودة في البازلت المتكوّن تحت قاع المحيط عند سلاسل الجبال في منتصف المحيط[2]. نتحدث هنا عن رطوبة شديدة[3].

تُعدّ النظرية التقليدية لتكوين الأجرام السماوية، كالكواكب والأقمار، مشكلةً جوهريةً تواجه العلمانيين. فبحسب هذه النظرية، بدأت هذه الأجرام ككرات منصهرة بردت تدريجيًا. وقد طرح علماء الكواكب العلمانيون، في خضمّ محاولتهم فهم الاكتشاف الجديد لوجود الماء في أعماق القمر، بعض الأفكار لتفسير ذلك، إلا أن كل فكرةٍ منهم لا تستطيع تجاوز مشكلة "الانصهار" المذكورة آنفًا، فضلًا عن مشاكل أخرى. فهم يقولون إن القمر ربما يكون قد حصل على مائه من الأرض في بداياتها، رغم أن الصخور المنصهرة كانت ستُطلق جميع المواد المتطايرة (المواد سريعة التبخر). أو، في حال فشل هذه الفرضية، يقولون إن القمر ربما يكون قد استمدّ مائه من النيازك. لكن لا تتوافق أيٌّ من هاتين الفكرتين مع فرضيات التكوين العلمانية.

ماذا عن الأرض؟ من أين حصلت على مائها؟ يعلم علماء الكواكب أن الأرض قريبة جدًا من الشمس بحيث لا يمكنها الحصول على أي ماء من قرص المادة الذي يعتقد العلماء العلمانيون أنه شكّل نظامنا الشمسي. حاول بعض العلمانيين تخيّل سيناريوهات غير محتملة لتغيير الأرض موقعها جذريًا بين الكواكب، بحيث اكتسب كوكبنا الماء من مناطق أبعد بكثير في النظام الشمسي، ثم انتقل بطريقة ما إلى موقعه الحالي الأقرب إلى الشمس. لكن هذا سيستغرق وقتًا طويلًا، حتى لو كان ممكنًا. لا يوجد سبب لحدوث ذلك، ولا دليل أو ملاحظة على حدوث أي هجرة كوكبية من هذا القبيل؛ أو أن مثل هذه الآلية قادرة على توفير الماء للأرض بأي حال من الأحوال. إنها مجرد تكهنات جامحة. يُفند الزمن الفرضيات العلمانية والطبيعية بطرق أخرى أيضًا. يعتقد

---

[1] Water found on moon could lead to lunar colonies,www.news.com.au, 24 September 2009, accessed May 2013

[2] Hauri, E.H., Weinreich, T., Saal, A.E., Rutherford, M.C. and Van Orman, J.A., High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions, Science 333(6039):213–215, 2011; www.sciencemag.org

[3] Silvestru, E., The not-so-dark side of the Moon, creation.com/young-moon-active-mantle, 23 August 2011

العديد من العلماء أن محيطات الأرض نفسها نشأت في معظمها من اصطدامات النيازك الجليدية. لكن كمية المياه في محيطات الأرض (وفي صخورها الداخلية) هائلة لدرجة أنه لا يوجد وقت كافٍ لتطبيق هذه النظرية. كيف يُعقل أن يكون للأرض وقت كافٍ لاكتساب مياهها من خلال عملية تراكم اصطدامات النيازك البطيئة للغاية؟ يواجه العلمانيون معضلة حقيقية لأنهم يعلمون أن الماء لا يمكن أن يظهر في الفضاء من العدم. يشعرون بأنهم مضطرون لمحاولة تفسير مصدره تفسيرًا طبيعيًا، لكن أفكارهم تتلاشى[1].

بغض النظر عن مسألة كيفية حصول الأرض على احتياطياتها الهائلة من الماء، يقول بعض العلماء إن النيازك الجليدية لا بد أنها ساهمت في توفير مياه القمر. ولكن إذا كان هذا صحيحًا، فكيف ارتبط الماء كيميائيًا بصخور القمر الداخلية؟ إن وجود شوائب مائية في الصخور لا يتوافق مع فكرة اصطدام النيازك الجليدية بالقمر وتغييرها لبنيته الداخلية بعد تشكله وتصلبه. ولكن إذا حدث ذلك عندما كان القمر منصهرًا تمامًا، فإن مشكلة الحرارة تُضعف هذه الفرضية، لأن كل الماء كان سيُقذف إلى الفضاء. وكان لا بد أن يحدث هذا القصف في المراحل الأولى، إذ يعلم العلماء من خلال دراسة "الكيمياء الجيولوجية" للصخور أن الماء كان موجودًا منذ اللحظات الأولى لتكوين القمر.

ومن الاكتشافات الحديثة الأخرى أن القمر يبدو أنه لا يزال نشطًا جيولوجيًا. إذ تُشاهد نقاط ضوئية بشكل متكرر من التلسكوبات الأرضية، مما يشير إلى ظهور الحمم البركانية على سطحه[2]. هذا دليل على حداثة عمر القمر الجيولوجي. فقد تنبأت العلوم العلمانية بأن القمر سيكون قديماً جداً بحيث لا يمكنه الاحتفاظ بحرارته الداخلية على مدى مليارات السنين المزعومة. في الكتاب المقدس، يخبرنا الله أنه خلق الأرض من الماء، وبالماء. بعبارة أخرى، كانت بداية الأرض مائية، لا منصهرة. ويخبرنا أيضًا أنه خلق القمر في اليوم الرابع كاملًا وجاهزًا لأداء مهمته. إن الدليل القاطع على بداية القمر المائية، وهو اكتشاف مذهل للعلم الحديث، يتوافق تمامًا مع ما جاء في الكتاب المقدس. إنه بالتأكيد يتوافق مع ما أخبرنا به الله عن خلق الأرض وقمرها.[3].

---

[1] ) Samec, R.G., Lunar formation—Collision theory fails, J. Creation 27(2):11–12, 2013

[2] ) Walker, T., NASA pictures support biblical origin for Moon, Creation 33(2):50–52, 2011; creation.com/nasa-shrinking-moon

[3] ) Humphreys, D.R., Starlight and Time: Solving the Puzzle of Distant Starlight in a Young Universe, Master Books, USA, 1994. In Chapter 2

## صور ناسا تدعم الأصل التوراتي للقمر

كشفت صور جديدة التقطتها إحدى مركبات ناسا الفضائية عن وجود تجاويف صغيرة منتشرة على سطح القمر، مما يشير إلى أنه ليس باردًا وخاليًا من الحياة كما كان يُعتقد سابقًا. ونشر فريق بحثي بقيادة عالم الجيولوجيا الكوكبية الدكتور توماس واترز[1]، من مركز دراسات الأرض والكواكب في متحف سميثسونيان الوطني للطيران والفضاء في واشنطن العاصمة، نتائج دراسته في مجلة ساينس[2] Science.

تُعدّ هذه المنحدرات صغيرة نسبيًا، ما يُفسّر عدم رصدها حتى كشفت عنها الصور عالية الدقة التي التقطها مسبار استطلاع القمر المداري (LRO). وهي منحنية كالفص، ويبلغ ارتفاع أكبرها حوالي 100 متر وطولها عدة كيلومترات. أما معظمها فلا يتجاوز ارتفاعه 10 أمتار، وهو أقصر بكثير.

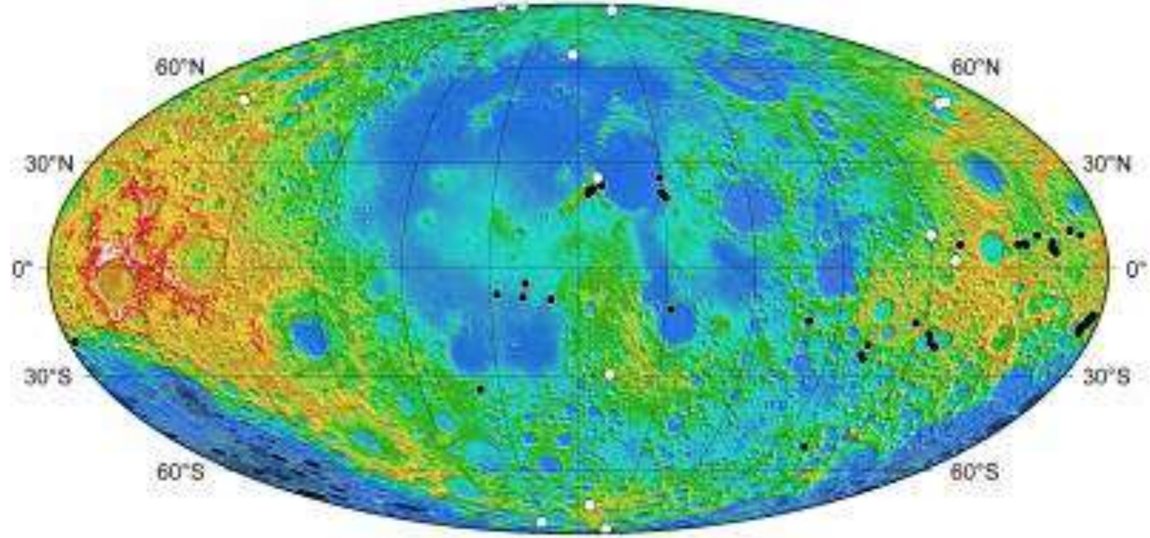
اكتُشفت أولى المنحدرات ذات الشكل الفصي على سطح القمر في أوائل سبعينيات القرن الماضي من خلال صور التقطتها مهمات أبولو 15 و16 و17، لكن تلك الصور لم تُغطِّ سوى المنطقة القريبة من خط استواء القمر. وقد اكتشف فريق واترز 14 منحدرًا إضافيًا، سبعة منها باتجاه قطبي القمر، ما يُشير بقوة إلى أن هذه المنحدرات ظاهرة عالمية.

الصورة اسفل مواقع المنحدرات الفصية على سطح القمر. النقاط السوداء = منحدرات معروفة سابقًا. النقاط البيضاء = منحدرات تم اكتشافها حديثًا في صور مركبة استطلاع القمر المدارية (LRO).

---

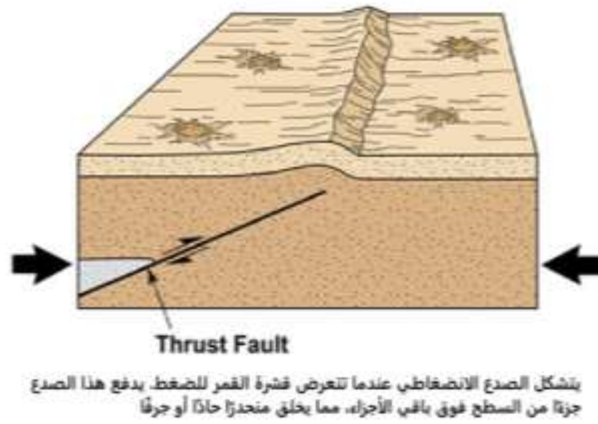
[1] Chow, D., Incredible, shrinking Moon revealed in photos, SPACE.com, 19 August 2010; space.com/scienceastronomy/shrinking-moon-new-lunar-photos-100819.html

[2] Watters, T.R. and 10 others, Evidence of recent thrust faulting on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter camera, Science 329(5994):936–940, 20 August 2010; DOI: 10.1126/science.1189590




يقترح الفريق أن قشرة القمر بأكملها قد انكمشت، مما أدى إلى تكوين صدوع انزلاقية دفعت أجزاءً محددة من سطحه إلى الأعلى. ويرجحون أن يكون تبريد باطن القمر هو القوة الدافعة الرئيسية لهذا الانكماش. وعلى نطاق عالمي، يُعدّ الانكماش صغيرًا نسبيًا، إذ لا يتجاوز 100 متر على امتداد نصف قطر القمر البالغ حوالي 3500 كيلومتر. لهذا الاكتشاف آثار بالغة الأهمية على النظريات المتعلقة بأصل القمر وتاريخه. فهو يتوافق مع الرواية التوراتية، ولكنه يتعارض مع المعتقدات التطورية الراسخة، وهو ما يفسر غرابة هذا الاكتشاف في الأوساط التقليدية.

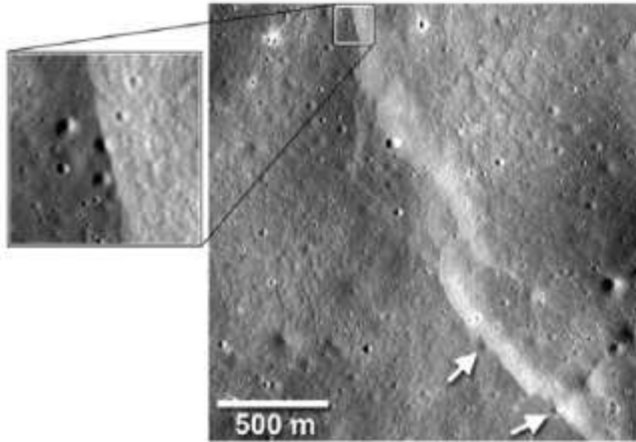
تشير النظريات الطبيعية السائدة إلى أن القمر تشكّل قبل حوالي 4.5 مليار سنة، وكان يتألف في البداية من محيط من الحمم البركانية، منصهرة على الأرجح على امتداد محيطه. ومع مرور الوقت، تصلّبت الحمم واستمر القمر في التبريد حتى تلاشت جميع مصادر الحرارة منذ زمن بعيد. ويُعتقد أن القمر ظل باردًا وخاملًا طوال الثلاثة مليارات سنة الماضية.




يتشكل الصدع الانضغاطي عندما تتعرض قشرة القمر للضغط. يدفع هذا الصدع جزءًا من السطح فوق باقي الأجزاء، مما يخلق منحدرًا حادًا أو جرفًا

إلا أن هذه الشقوق الصغيرة تدل على أن القمر لم يبدأ بالتبريد إلا مؤخرًا، وأنه أكثر ديناميكية مما كان يُعتقد. ويُشكّل وجودها تحديًا مباشرًا للنظرية التقليدية لأصل القمر، ولا سيما عمره المفترض الذي يمتد لمليارات السنين.

يعتقد الفريق أن هذه المنحدرات من بين أحدث المعالم على سطح القمر، ويعود ذلك جزئيًا إلى أنها تقطع فوهات صغيرة. ونظرًا لتعرض القمر باستمرار لوابل من النيازك، فمن المرجح أن تكون معالم مثل الفوهات الصغيرة (التي يقل قطرها عن 350 مترًا تقريبًا) حديثة نسبيًا، لأنها تتلاشى بسرعة بفعل اصطدامات أخرى ولا تدوم طويلًا. لذا، إذا ما تضررت فوهة صغيرة بفعل منحدر، فإن المنحدر يكون قد تشكل بعد الفوهة ويكون أحدث عمرًا. ومن الأدلة الأكثر إقناعًا أن الفوهات الكبيرة، التي يُرجح أنها قديمة، لا تظهر فوق أي من هذه المنحدرات، وأن المنحدرات تبدو واضحة المعالم وغير متآكلة نسبيًا[1].



قطع جرف صدعي عدة فوهات نيزكية صغيرة (مُشار إليها بالأسهم) وشوّهها. حمل الصدع موادًا إلى أعلى الفوهات وفوقها، دافنًا أجزاءً من قيعانها وحوافها. غُطّي حوالي نصف حافة وقاع فوهة قطرها 20 مترًا (مُشار إليها بالمربع). تُدمّر الفوهات الصغيرة بسرعة بفعل الاصطدامات الأحدث، لذا يُعتبر الصدع (الأحدث) حديثًا نسبيًا

Image NASA/Goddard/Arizona State University/Smithsonian

استنادًا إلى هذه الأدلة، قدّر الفريق، انطلاقًا من رؤيتهم التطورية طويلة الأمد، أن هذه المنحدرات لا يمكن أن يتجاوز عمرها مليار عام، ولكنها قد لا تتجاوز 100 مليون عام، أو حتى أصغر. وهذا نطاق زمني واسع للغاية.

في الواقع، ثمة أدلة موثقة جيدًا على وجود نشاط جيولوجي على سطح القمر في الوقت الحاضر. وتتجلى هذه الأدلة في ظواهر قمرية عابرة، تشمل تغيرات لونية موضعية، وبقعًا أو خطوطًا ضوئية، وسحبًا، وضبابًا، وحجبًا، وغيرها من الملاحظات التي تدل على نشاط جيولوجي على سطح القمر[2]. تعود أقدم الملاحظات المُسجلة إلى ألف عام، وفي بدايات استخدام التلسكوب، كان يتم الإبلاغ عن مثل هذه الأحداث بحرية. تتسم الظواهر القمرية العابرة بطبيعتها الزائلة، حيث أن معظم التقارير صادرة عن مراقب واحد، ولا يمكن تأكيدها بشكل

---

[1] Neal-Jones, N. and Steigerwald, B., NASA’s LRO Reveals ‘Incredible Shrinking Moon’, 19 August 2010; nasa.gov/mission_pages/LRO/news/shrinking-moon.html

[2] DeYoung, D.B., Transient lunar phenomena: a permanent problem for evolutionary models of Moon formation, Journal of Creation 17(1):5–6

مستقل. وقد ساهم الاعتقاد بنظرية التطور طويلة الأمد في التقليل من أهمية هذه الادعاءات، بل وحتى تثبيط الإبلاغ عنها[1].

استنادًا إلى هذه الأدلة، قدّر الفريق، انطلاقًا من رؤيتهم التطورية طويلة الأمد، أن هذه المنحدرات لا يمكن أن يتجاوز عمرها مليار عام، ولكنها قد لا تتجاوز 100 مليون عام، أو حتى أصغر. وهذا نطاق زمني واسع للغاية.

في الواقع، ثمة أدلة موثقة جيدًا على وجود نشاط جيولوجي على سطح القمر في الوقت الحاضر. وتتجلى هذه الأدلة في ظواهر قمرية عابرة، تشمل تغيرات لونية موضعية، وبقعًا أو خطوطًا ضوئية، وسحبًا، وضبابًا، وحجبًا، وغيرها من الملاحظات التي تدل على نشاط جيولوجي على سطح القمر. تعود أقدم الملاحظات المُسجلة إلى ألف عام، وفي بدايات استخدام التلسكوب، كان يتم الإبلاغ عن مثل هذه الأحداث بحرية. تتسم الظواهر القمرية العابرة بطبيعتها الزائلة، حيث أن معظم التقارير صادرة عن مراقب واحد، ولا يمكن تأكيدها بشكل مستقل. وقد ساهم الاعتقاد بنظرية التطور طويلة الأمد في التقليل من أهمية هذه الادعاءات، بل وحتى تثبيط الإبلاغ عنها.

مع ذلك، تُعدّ المنحدرات سمةً دائمةً على سطح القمر، ويمكن تأكيد وجودها من خلال المراقبة المتكررة. ولإنتاج مقدار الإجهاد اللازم لتكوين هذه الصدوع الانضغاطية، قدّر الفريق أن لبّ القمر كان بحاجة لأن يكون محاطًا بمحيط من الصهارة. ويشيرون إلى أن هذا المحيط من الصهارة ربما يكون قد تشكّل نتيجة اصطدام أجسام فضائية ضخمة بسطح القمر خلال ما يُعرف (والمثير للجدل) بـ"القصف الشديد المتأخر". وعلى المقياس الزمني التطوري، كان ذلك قبل حوالي 4 مليارات سنة، مما يعني أنه لا يُفسّر الانكماش الأخير. إذ كان من المفترض أن تتبدد الحرارة منذ مليارات السنين.

ويُحسب للفريق أنه لم يستبعد احتمال أن يكون القمر لا يزال نشطًا تكتونيًا ويُشكّل منحدرات حتى اليوم. ويخططون لإعادة فحص سجلات الزلازل القمرية من أجهزة قياس الزلازل التي رُكّبت خلال مهمات أبولو في سبعينيات القرن الماضي. وقد نُسبت هذه الزلازل إلى المد والجزر الجاذبي على سطح القمر، وارتطام النيازك،

[1] Whitcomb, J.C. and DeYoung, D.B., The Moon: It's Creation, Form and Significance, BHM Books, Winona Lake, IN, pp. 105–127, 1978

والتغيرات في درجات الحرارة بين الليل والنهار. مع ذلك، يعتزم فريق واترز التحقق مما إذا كان بالإمكان عزو بعض الهزات القمرية المسجلة إلى صدوع انزلاقية.

كما يعتزمون أيضاً مقارنة صور مركبة استطلاع القمر المدارية (LRO) الجديدة مع صور كاميرات أبولو، بهدف معرفة ما إذا طرأت أي تغييرات على أشكال المنحدرات خلال الثلاثين عاماً الماضية.

عُثر أيضًا على منحدرات فصية على سطح عطارد. ويُعتقد أن عملية انكماش الكوكب نفسها هي التي أنتجت هذه المنحدرات الصدعية الضخمة نسبيًا، إذ يبلغ طولها مئات الكيلومترات وارتفاعها 1000 متر. ويمتد أكبرها لأكثر من 1000 كيلومتر. تشير هذه المنحدرات إلى أن عطارد كان في يوم من الأيام منصهرًا، وأن قشرته انكمشت بضعة كيلومترات مع استمرار تبريد باطنه المنصهر وانكماشه.

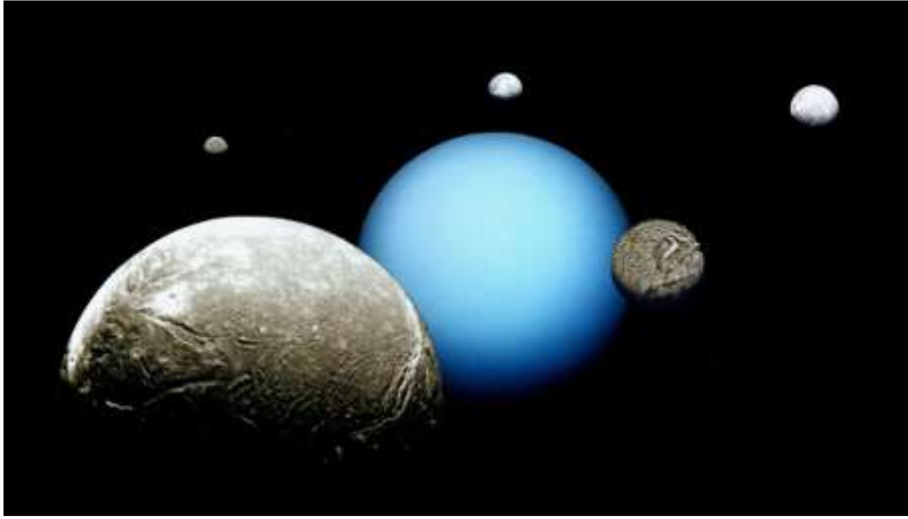
فلماذا لا نرى صدوعًا دفعية عملاقة على سطح القمر، مع أنه يُعتقد أيضًا أنه كان منصهرًا في يوم من الأيام؟ على الرغم من أنه أصغر قليلًا من عطارد (أكثر من ثلث حجمه)، إلا أن انكماش باطنه المنصهر كان من المفترض أن يُنتج صدوعًا هائلة. ويشير بعض الباحثين إلى أن هذه الصدوع كانت موجودة بالفعل، لكن قصف النيازك محاها بمرور الزمن. ومع ذلك، يُفسَّر غيابها ببساطة بانخفاض درجة الحرارة الأولية، وهو الاستنتاج الذي توصل إليه قائد الفريق واترز.

تتعارض الصدوع المكتشفة حديثًا مع المعتقدات التطورية التي تفترض عمرًا طويلًا للقمر، لكنها تتوافق مع النموذج التوراتي. فهي تُناقض فرضيات التكوين التطوري التي تفترض وجود قمر منصهر في البداية، وتشير بدلًا من ذلك إلى أن درجة حرارة القمر الأولية لم تكن مختلفة كثيرًا عن درجة حرارته الحالية، وهو ما يتوافق

مع الرواية التوراتية. كما أنها تُناقض المقياس الزمني الذي يبلغ مليار سنة، مما يُشير إلى أن القمر، رفيق الأرض، حديث نسبيًا. وضمن الإطار التوراتي، يُرجح أن يكون قصف النيازك للقمر قد حدث قبل حوالي 4500 عام خلال الطوفان. وتتوافق الصدوع المكتشفة مع هذا التسلسل للأحداث ومع المقياس الزمني التوراتي الأقصر.

## هل توجد محيطات تحت سطح قمرين من أقمار أورانوس؟

خلص فريق من الباحثين بقيادة عالم الكواكب الدكتور كاليب ستروم Caleb Strom من جامعة نورث داكوتا إلى أن قمري أورانوس، أربيل Ariel وميراندا Miranda (الواقعين مباشرةً على يسار ويمين أورانوس ذي اللون الأزرق الباهت في الصورة، على التوالي)، كانا يحتويان في السابق على محيطات مائية في باطنهما[1]. وقد توصلوا إلى هذه النتائج، المنشورة في مجلتي إيكاروس ومجلة علوم الكواكب، من خلال دراسة الشقوق، أو ما يُعرف بتشققات الإجهاد، على سطحي القمرين، وباستخدام نماذج حاسوبية لتحديد الظروف الداخلية اللازمة لتكوين هذه الشقوق[2].



تنتج هذه الشقوق الإجهادية عن قوى الجذب التي يمارسها كوكب أورانوس على قمري أريل وميراندا، وبدرجة أقل، عن أقمار أورانوس الأخرى. تُشوّه هذه القوى ببطء شكل هذين القمرين، فتصبح أشكالهما أحيانًا أقرب إلى شكل كرة القدم الأمريكية منها إلى الكرة. كما يمكن لهذه القوى أن تُسخّن باطن الأقمار الصغيرة مثل أريل وميراندا. وتزداد هذه القوى قوةً عندما تكون مدارات أريل وميراندا ذات انحراف مركزي أعلى، أي عندما تكون

---

[1] Kelley, M. M. Uranian Moon Ariel’s Surface Features Point to a Past Ocean Over 100 Miles Deep. Phys.org. Posted on phys.org September 29, 2025, accessed September 29, 2025

Kelley, M. M. Is There an Ocean Lurking Beneath One of Uranus’ Moons? Planetary Science Institute. Posted on psi.edu November 17, 2024, accessed September 29, 2025

[2] Strom, C. et al. 2024. Constraining Ocean and Ice Shell Thickness on Miranda from Surface Geological Structures and Stress Modeling. The Planetary Science Journal. 5 (226): 1–18

Strom, C. et al. 2026. Constraining Ocean and Ice Shell Thickness on Ariel from Surface Geologic Structures and Stress Mapping. Icarus. 444: 116822

مداراتهما حول أورانوس أكثر استطالةً. وكما أوضح الدكتور أليكس باتوف، المؤلف المشارك في ورقة بحثية عن إيكاروس، "لتكوين هذه الشقوق [على سطح أريبل]، لا بد من وجود طبقة رقيقة جدًا من الجليد على محيط شاسع، أو انحراف مركزي أعلى ومحيط أصغر... ولكن في كلتا الحالتين، نحتاج إلى محيط لنتمكن من تكوين الشقوق التي نراها على سطح أريبل[1].

ينطبق منطق مماثل على ميراندا. في الواقع، لم يستبعد العلماء وجود محيط سائل داخلها. ويعتقد بعض الباحثين أن ما يصل إلى 23 جرمًا في نظامنا الشمسي، بخلاف الأرض، قد تحتوي على ماء متجمد أو سائل[2]. وإذا أُضيفت أريبل وميراندا إلى هذه القائمة، سيرتفع العدد إلى 25.

يرغب علماء التطور بشدة في العثور على دليل على وجود ماء سائل خارج كوكب الأرض، لاعتقادهم أن ذلك سيجعل نظرية التطور أكثر مصداقية. إلا أن هذا المنطق خاطئٌ بوضوح، فالماء، مع أنه ضروري للحياة كما نعرفها، إلا أنه يُضعف فرضيات الأصل الكيميائي للحياة[3]. ورغم أن التمني قد يُؤثر على حكم العلماء التقليديين إلى حد ما، إلا أن هناك أدلة قوية على وجود ماء سائل على قمر إنسيلادوس التابع لكوكب زحل وقمر أوروبا التابع لكوكب المشتري[4]. في الواقع، أحد أهداف مهمة يوروبا كليبر هو محاولة التحقق مما إذا كان قمر أوروبا يحتوي على محيط جوفي. كما نُشرت أدلة على وجود محيط جوفي على قمر ميمس التابع لكوكب زحل العام الماضي في مجلة نيتشر Nature.[5]

إن احتمال احتواء أجرام أخرى في النظام الشمسي، غير الأرض، على الماء السائل، يُعدّ أمرًا مثيرًا للغاية للمسيحيين المؤمنين بالكتاب المقدس. أولًا، خلق الرب الأرض من كتلة مائية (تكوين ١:٢، ٢ بطرس ٣:٥)، وقد

---

[1] Kelley, M. M. Uranian Moon Ariel's Surface Features Point to a Past Ocean Over 100 Miles Deep. Phys.org. Posted on phys.org September 29, 2025, accessed September 29, 2025

[2] Wenz, J. and M. Wagh. There Are 23 Moons and Planets with Water in Our Solar System. Popular Mechanics. Posted on popularmechanics.com, last updated December 8, 2022, accessed September 29, 2025

[3] Vieira, A. d. N. et al. 2020. The Ambivalent Role of Water at the Origins of Life. FEBS Letters. 594 (17): 2717–2733

[4] Hebert, J. Jupiter's Young Moons. Acts & Facts. 52 (5): 14–16

[5] Lainey, V. et al. 2024. A Recently Formed Ocean Inside Saturn's Moon Mimas. Nature. 626 (7998): 280–282; Hebert, J. 2024. A Subsurface Ocean on Mimas? Creation Science Update. Posted on ICR.org March 18, 2024, accessed September 29, 2025

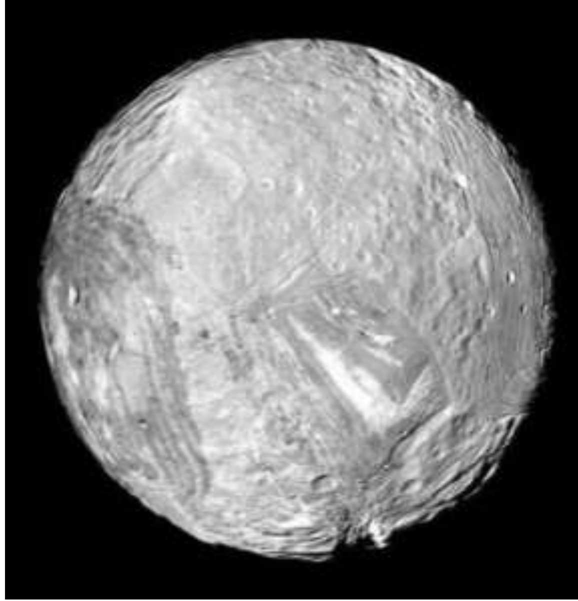
أشار الفيزيائي المؤيد لنظرية الخلق، الدكتور راسل همفريز، منذ زمن طويل إلى أنه ربما خلق الأجرام السماوية من الماء أيضًا. وبالتالي، من المنطقي أن تحتفظ بعض الأجرام في نظامنا الشمسي ببعض الماء البدائي[1].

ثانيًا، يُعدّ وجود الماء السائل على هذه الأقمار دليلًا على حداثة عمرها. فالكواكب والأقمار الصغيرة تُشعّ الحرارة بسرعة إلى الفضاء، لذا فمن المرجح أن يكون أي ماء بداخلها قد تجمد منذ دهور. ولهذا السبب تحديدًا، فوجئ الباحثون التقليديون بالأدلة الجيولوجية على وجود ماء سائل سابق (أو متبقٍ) على ميراندا وأقمار أخرى: "نظرًا لصغر حجم ميراندا وقدمها، لم يتوقع العلماء أن تحتوي على محيط. بل افترضوا أن أي حرارة متبقية من تكوينها قد تبددت منذ زمن بعيد."

[1] Humphreys, D. R. 1984. The Creation of Planetary Magnetic Fields. Creation Research Society Quarterly. 21 (3): 140–149.

## هل يوجد محيط كامن تحت أحد أقمار أورانوس؟

جاء في تقرير Planetary Science Institute ، تشير دراسة نُشرت في مجلة علوم الكواكب[1]Planetary Science إلى أن قمر ميراندا التابع لكوكب أورانوس ربما كان يخفي محيطًا تحت سطحه في الماضي. قاد هذه الدراسة طالب الدراسات العليا كالب ستروم من جامعة نورث داكوتا، وشارك في تأليفها أليكس باتهوف، العالم البارز في معهد علوم الكواكب. ميراندا هو أصغر أقمار أورانوس الكروية وأقربها إليه. يتميز بتضاريسه الفريدة من وديان صدعية عملاقة، وتلال، وأخاديد، وصدوع، ويبدو سطحه كلوحة فسيفسائية غير منتظمة. يعتقد العلماء أن هذه التضاريس السطحية المذهلة تشكلت بشكل أساسي بفعل تأثير جاذبية أورانوس أثناء دوران القمر حوله، وهي ظاهرة تُعرف باسم "الانحناء المدّي".



يقول باتهوف Patthoff: "يقع ميراندا بالقرب من أورانوس، ويتعرض لجاذبية أقوى مقارنةً بالأقمار الأخرى". "كما أنه لا يدور في خط مستقيم تمامًا مع الأقمار الأخرى. فهو يميل بزاوية خمس درجات تقريبًا عن خط الاستواء، ما يكفي لإضافة تذبذب إضافي إليه. وأثناء دورانه، يتغير شكله من كرة قدم إلى كرة قدم أمريكية ثم يعود إلى شكله الأصلي، ويسخن من الداخل، مما قد يوفر مصدرًا للماء السائل ويُحدث اضطرابات على سطحه." قاد باتهوف Patthoff الجهود المبذولة لنمذجة ما قد يحدث تحت سطح ميراندا لتشكيل سطحه، وساعد ستروم في تفسير تلك النماذج. كان باتوف وزملاؤه مهتمين بشكل خاص بمعرفة ما إذا كانت ضغوط المد والجزر كافية لكسر سطح ميراندا الجليدي، وهو ما يبدو أنه يحدث. قال: "وجدنا أن ذلك ممكن، لكنك تحتاج إلى محيط أعمق بكثير مما كنت أتوقع لحدوث ذلك. فعندما يكون هناك محيط تحت الجليد، يتحرك الماء بسهولة أكبر ويضغط على الغلاف الجليدي، ما يضيف ضغوطًا إضافية عليه."

[1] ( 17 Nov 2024 , https://www.psi.edu/blog/is-there-an-ocean-lurking-beneath-one-of-uranus-moons/

وجدوا أن محيط ميراندا كان موجودًا على الأرجح قبل 100 إلى 500 مليون سنة، وهي فترة حديثة نسبيًا على المقاييس الزمنية الجيولوجية، وكان عمقه لا يقل عن 100 كيلومتر تحت قشرة جليدية لا يتجاوز سمكها 30 كيلومترًا. يبلغ عرض ميراندا 750 كيلومترًا فقط، لذا كان المحيط سيملأ ما يقارب نصف حجم القمر. نظرًا لصغر حجم ميراندا وقدمها، لم يتوقع العلماء وجود محيط فيها. بدلًا من ذلك، افترضوا أن أي حرارة متبقية من تكوينها قد تبددت منذ زمن بعيد. لا يستطيع الباحثون حتى الآن الجزم بوجود المحيط من عدمه. قال باتهوف: "لمعرفة ما إذا كان هناك محيط اليوم، علينا أن نذهب ونزور القمر".

## تشير معالم سطح قمر أورانوس، أرييل، إلى وجود محيط قديم يزيد عمقه عن 100 ميل

نشر معهد علوم الكواكب[1] Planetary Science Institute تقرير مفاده :

تشير أدلة متزايدة إلى وجود محيط جوفي كامن تحت السطح الجليدي لقمر أورانوس، أرييل. وقد حددت دراسة جديدة، نُشرت في مجلة إيكاروس، التطور المحتمل لهذا المحيط، ووجدت أنه ربما كان عمقه يزيد عن 170 كيلومترًا (100 ميل). وللمقارنة، يبلغ متوسط عمق المحيط الهادئ 4 كيلومترات (2.5 ميل). يقول أليكس باتهوف، العالم البارز في معهد علوم الكواكب، والمشارك في تأليف الدراسة: "يُعدّ أرييل فريدًا من نوعه بين الأقمار الجليدية".

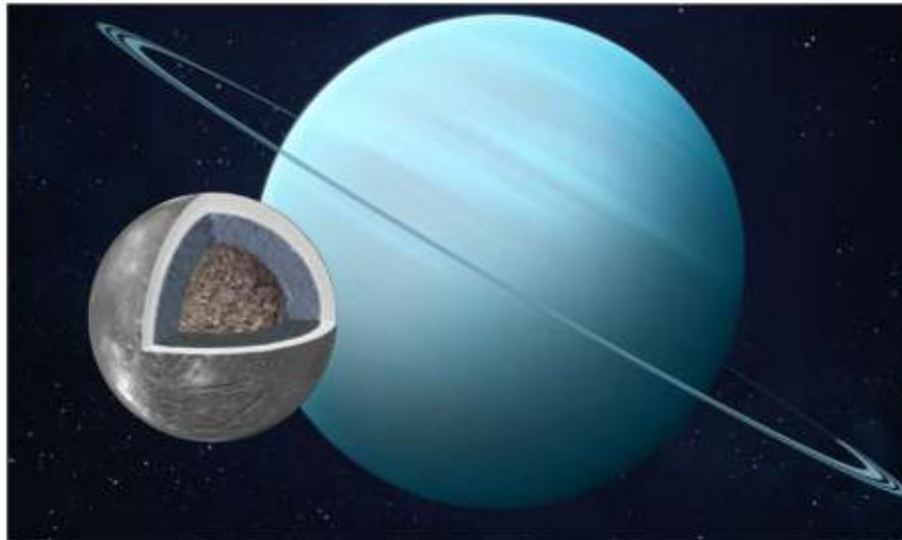
أرييل هو ألمع أقمار أورانوس وثاني أقربها إليه، ويبلغ قطره 1159 كيلومترًا (720 ميلًا) فقط (المسافة من معهد علوم الكواكب في توكسون إلى مدينة سولت ليك في ولاية يوتا)، مما يجعله رابع أكبر قمر في نظام أورانوس. ويقول كالب ستروم، المؤلف الرئيسي للدراسة، وهو خريج حديث من جامعة نورث داكوتا: "يحتوي أرييل على معالم جيولوجية قديمة جدًا، مثل الفوهات، إلى جانب معالم حديثة جدًا، مثل التضاريس الملساء التي ربما تكونت بفعل البراكين الجليدية". يحتوي سطح أرييل على شقوق وتلال وأخاديد - قشرة انخفضت إلى مستوى أدنى من محيطها - بأحجام أكبر من أي مكان آخر تقريبًا في النظام الشمسي.

هذا السطح المذهل هو ما دفع إلى إجراء هذه الدراسة. أراد فريق البحث فهم البنية الداخلية السابقة وانحراف مدار الجسم عن الدائرة - أي مدى انحراف مداره عن الدائرة - اللازمين لتكوين الملامح المرئية على سطح أرييل اليوم. يمكن أن تُسهم هاتان السمتان في مقدار الضغط الذي يمكن أن يتعرض له السطح، مما يؤدي إلى تشققه تحت تأثير قوة الجاذبية أثناء دوران هذا القمر الصغير حول كوكبه الغازي العملاق. قال باتهوف: "في البداية، رسمنا خريطة للبنى الكبيرة التي نراها على السطح، ثم استخدمنا برنامجًا حاسوبيًا لمحاكاة إجهادات المد والجزر على السطح، والناتجة عن تشوه أرييل من شكل كرة القدم إلى شكل بيضاوي تقريبًا ثم العودة إلى شكله الأصلي أثناء اقترابه وابتعاده عن أورانوس خلال مداره". "من خلال الجمع بين النموذج وما نراه على السطح، يمكننا استخلاص استنتاجات حول غرابة أريل في الماضي ومدى سمك المحيط الذي ربما كان عليه."

[1] ) 29 Sep 2025 , https://phys.org/news/2025-09-uranian-moon-ariel-surface-features.html#google_vignette

وجد الفريق أن مدار أريبل كان يحتاج في الماضي إلى انحراف مداري يبلغ حوالي 0.04، أي ما يقارب 40 ضعف قيمته الحالية. ورغم أن 0.04 قد لا تبدو قيمة كبيرة، إلا أن الانحراف المداري يُعزز تأثيرات قوى المد والجزر، وكان مدار أريبل آنذاك أكثر انحرافًا بأربع مرات من مدار قمر أوروبا التابع لكوكب المشتري، والذي يتعرض لقوى المد والجزر التي تدفعه وتسحبه مُسببةً تشققات وتمزقات في سطحه. ومع ذلك، سيظل المدار يبدو دائريًا للعين المجردة. وقال باتهوف: "لتكوين هذه التشققات، لا بد من وجود طبقة جليدية رقيقة جدًا فوق محيط شاسع، أو انحراف مداري أكبر ومحيط أصغر. ولكن في كلتا الحالتين، نحتاج إلى محيط لنتمكن من تكوين التشققات التي نراها على سطح أريبل". علاوة على ذلك، تُعد هذه الدراسة الثانية ضمن سلسلة من الأبحاث التي تبحث في باطن أقمار أورانوس في الماضي. في العام الماضي، نشر الفريق نفسه ورقة بحثية عن ميراندا بنتائج مماثلة.

يقول توم نوردهايم Tom Nordheim، الباحث الرئيسي والمشارك في تأليف الدراسة من مختبر الفيزياء التطبيقية بجامعة جونز هوبكنز: "نجد أدلة تشير إلى أن نظام أورانوس قد يضم عوالم محيطية توأمية". ويضيف: "للأسف، لم نرَ سوى النصف الجنوبي من أريبل وميراندا. لكن نتائجنا تُتيح لنا التنبؤ بما قد تراه مركبة فضائية مستقبلية على النصف الشمالي غير المصوّر من القمرين، مثل مواقع الشقوق والتلال هناك. في نهاية المطاف، نحتاج فقط إلى العودة إلى نظام أورانوس لنرى بأنفسنا".



New research suggests that Ariel, a moon of Uranus, might have once harbored an ocean about 100 miles (170km) deep. Credit: NASA/JPL-Caltech/PSI/Mikayla Kelley/Peter Buhler

## أقمار المشتري الفتية

في عام 1610، وجّه غاليليو غاليلي تلسكوبه نحو كوكب المشتري، فاكتشف أكبر أربعة أقمار من بين أقماره الـ 95 المعروفة. وقد عرّفها بأنها أقمار تابعة، فأصبحت تُعرف باسم أقمار غاليليو. وهي، مرتبة حسب تزايد بعدها عن المشتري، آيو Io، أوروبا Europa، غانيميد Ganymede، وكاليستو Callisto.



يتميز سطح قمر أوروبا بنعومته ومظهره الشاب. يُعتقد أن الخدوش أو الشقوق الطويلة على سطحه، والتي تُسمى الخطوط، ناتجة عن المد والجزر في "غلاف" ضخم تحت السطح من الماء السائل، أشبه بمحيط "خفي". في الماضي، واجه العلماء التقليديون صعوبة في تفسير دفء أوروبا الظاهر، على الرغم من أن البعض يرى أن النشاط الإشعاعي والتسخين الناتج عن المد والجزر معًا قد يكونان تفسيرًا معقولًا[1].

ولأن الماء السائل ضروري للحياة كما نعرفها، يعتقد علماء التطور أن العثور على الماء السائل في الفضاء سيجعل قصة التطور تبدو أكثر منطقية. مع ذلك، فرغم أن الماء ضروري لوجود الحياة، إلا أنه غير كافٍ. في الواقع، يُشكل الماء مشكلة لسيناريوهات أصل الحياة التطورية، لأنه يُفكك الجزيئات المعقدة التي يدعي أنصار التطور أنها تشكلت تلقائيًا في حساء كيميائي منذ مليارات السنين[2].

---

[1] ) Spencer, W. 2015. Warm icy moons. Journal of Creation. 29 (3): 97-103

[2] ) Vieira, A. d. N. et al. 2020. The ambivalent role of water at the origins of life. FEBS Letters. 594 (17): 2717-2733

قمر غانيميد هو أكبر أقمار غاليليو الأربعة، ويتجاوز حجمه حجم كوكب عطارد. يعتقد البعض أنه يمتلك محيطًا جوفيًا. وقد فوجئ العلماء التقليديون بوجود مجال مغناطيسي خاص بغانيميد. يستند علماء نظرية التطور التدريجي إلى نظرية الدينامو لتفسير استمرار المجالات المغناطيسية للكواكب والأقمار لمليارات السنين[1]. إلا أن نظرية الدينامو تعاني من العديد من المشاكل، فهي تفترض وجود لب منصهر للقمر أو الكوكب المغناطيسي، مما يستلزم وجود باطن دافئ. ويُعتقد أن النشاط الإشعاعي والتسخين المدّي ليسا تفسيرين كافيين لدفء غانيميد الظاهر، لذا كان من المتوقع أن يكون غانيميد باردًا جدًا بحيث لا يمتلك مجالًا مغناطيسيًا خاصًا به.

اقترح بعض العلماء أن "ثلج" الحديد، أو تكوّن بلورات كبريتيد الحديد داخل لبّ غانيميد، قد يُسهم في توفير الحرارة اللازمة. إلا أن هذه المقترحات تتطلب تركيزات محددة من الكبريت في اللبّ، والتي قد تكون موجودة أو غير موجودة. من الناحية النظرية، يُمكن لآلية كبريتيد الحديد أن تعمل لحوالي 3.8 مليار سنة، لكنها تتطلب أن يكون اللبّ في البداية مُكوّنًا من حوالي 36% كبريت وزناً، وهو تركيز "عالي جدًا" من الكبريت، ما قد يُناقض نظريات التطور الكوني المتعلقة بأصل غانيميد[2]. أما آلية "ثلج الحديد"، من جهة أخرى، فلا يُمكنها توفير الحرارة إلا لمدة أقصاها 800 مليون سنة[3].

كاليستو هو أكثر الأجرام المعروفة في النظام الشمسي كثافةً بالفوهات. وبحسب حسابات التطور التدريجي، يشير العدد الكبير من الفوهات إلى أن القمر قديم جدًا، على عكس حداثة سطح أوروبا الأملس. مع ذلك، فإن تقديرات العمر المستندة إلى الفوهات غير دقيقة. ثمة بعض الأدلة على وجود محيط سائل تحت سطح كاليستو. وقد أثار هذا الأمر دهشة العلماء التقليديين، نظرًا لبُعد كاليستو عن كوكب المشتري وأقمار غاليليو الأخرى، ما جعلهم يعتقدون أن الحرارة الناتجة عن قوى المد والجزر غير ذات أهمية.

---

[1]) Humphreys, D. R. 2013. Planetary Magnetic Dynamo Theories: A Century of Failure. In Proceedings of the Seventh International Conference on Creationism. M. Horstemeyer, ed. Pittsburgh, PA: Creation Science Fellowship, 7: 5

[2]) Bland, M. T., A. P. Showman, and G. Tobie. 2008. The production of Ganymede's magnetic field. Icarus. 198 (2): 384-399

[3]) Rückriemen, T., D. Breuer, and T. Spohn. 2018. Top-down freezing in a Fe-FeS core and Ganymede's present-day magnetic field. Icarus. 307: 172-196
Can a Top-down Freezing Core Explain Ganymede's Magnetic Field? Science Trends. Posted on sciencetrends.com August 22, 2018, updated March 14, 2020, accessed February 13, 2023

يمكن أن يوفر النشاط الإشعاعي بعض الحرارة، لكن العلماء التقليديين كانوا يعتقدون أن هذه الحرارة ستتسرب إلى الفضاء خلال بضع مئات من ملايين السنين. لهذا السبب، صُدموا بالأدلة التي تشير إلى وجود محيط تحت سطحه. وتساءل جيفري كارغل من هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية[1]: "لكن لم يصدق الناس ذلك تمامًا. كيف يمكن أن يكون لكاليستو محيط؟". ويعتقد البعض أن وجود كميات كافية من مادة مضادة للتجمد، مثل الأمونيا، أو ربما بعض الأملاح، قد يُفسر وجود مثل هذه المحيطات. لكن بالطبع، لا نعرف مقدار هذه الكميات، إن وجدت، الموجودة بالفعل في هذه المحيطات، بافتراض وجودها[2].

يُعدّ قمر أوروبا (يوروبا) من أقوى الأدلة على وجود محيط جوفي. كما توجد أدلة قوية على وجود محيط مماثل على قمر إنسيلادوس التابع لكوكب زحل. ويعتقد بعض العلماء أن محيطات جوفية قد توجد أيضًا على نحو اثني عشر جرمًا صغيرًا آخر في نظامنا الشمسي. قد يكون بعض هذا مجرد أمنيات لدى أنصار نظرية التطور، نظرًا لرغبتهم الشديدة في العثور على ماء سائل في الفضاء.

Klarreich, E. Callisto's watery secret. Nature News. Posted on nature.com July 26, 2001 ( [1]

Spohn, T. and G. Schubert. 2003. Oceans in the icy Galilean satellites of Jupiter? Icarus. 161 (2): 456-467 ( [2]

## هل يمكن أن يفسر اللب المتجمد من الأعلى إلى الأسفل المجال المغناطيسي لغانيميد[1]؟

يمتلك قمر غانيميد، التابع لكوكب المشتري، مجالًا مغناطيسيًا داخليًا. وكان هذا الاكتشاف من أكثر الاكتشافات غير المتوقعة خلال مهمة غاليليو عام 1996. غانيميد قمر جليدي، أي أن الماء يشكل ما بين 46 و48% من كتلته الإجمالية. ويتكون غلافه الخارجي من قشرة جليدية سميكة (900 كيلومتر)، وتحتها يقع غلاف صخري. أما الجزء الداخلي، فيُرجح أنه نواة معدنية.

وبينما قدم العلماء تفسيرات مختلفة لأصل المجال المغناطيسي لغانيميد، فإن النواة المعدنية هي المصدر الأرجح. فمنذ منتصف القرن العشرين، عُرف أن الحركات المعقدة للمعادن السائلة يمكن أن تؤدي إلى دينامو ذاتي الاستدامة في نوى الكواكب. ويحول هذا الدينامو المغناطيسي الهيدروديناميكي الطاقة الحركية إلى طاقة مغناطيسية بناءً على مبدأ الحث الكهرومغناطيسي. نتيجةً لذلك، تتضخم الاضطرابات الصغيرة في المجال المغناطيسي، مما يؤدي إلى مجال مغناطيسي ذي سعة محدودة، والذي يُقاس في نهاية المطاف بواسطة مهمات الفضاء.

مع ذلك، لا يُظهر كل كوكب أو قمر ذي نواة معدنية دينامو مغناطيسي. ومن الملاحظات الشائعة أن الأجرام الأرضية الأصغر من الأرض، مثل المريخ والقمر، وربما بعض الكويكبات، تُظهر فقط آثار مجال مغناطيسي قديم، لكنها تفتقر إلى النشاط المغناطيسي اليوم. وفي هذا السياق، يُعد المجال المغناطيسي الحالي لغانيميد أمرًا مُثيرًا للدهشة.



ومن الشروط الأساسية المهمة لوجود دينامو النواة حركة السائل الموصل للكهرباء (الطاقة الحركية). والمصدر الأكثر ترجيحًا لتوليد الطاقة الحركية في النواة المعدنية هو الحمل الحراري الكيميائي. ويشير الحمل الحراري الكيميائي إلى آليتين محركتين لحركة السوائل: الحمل الحراري الناتج عن اختلافات درجات الحرارة

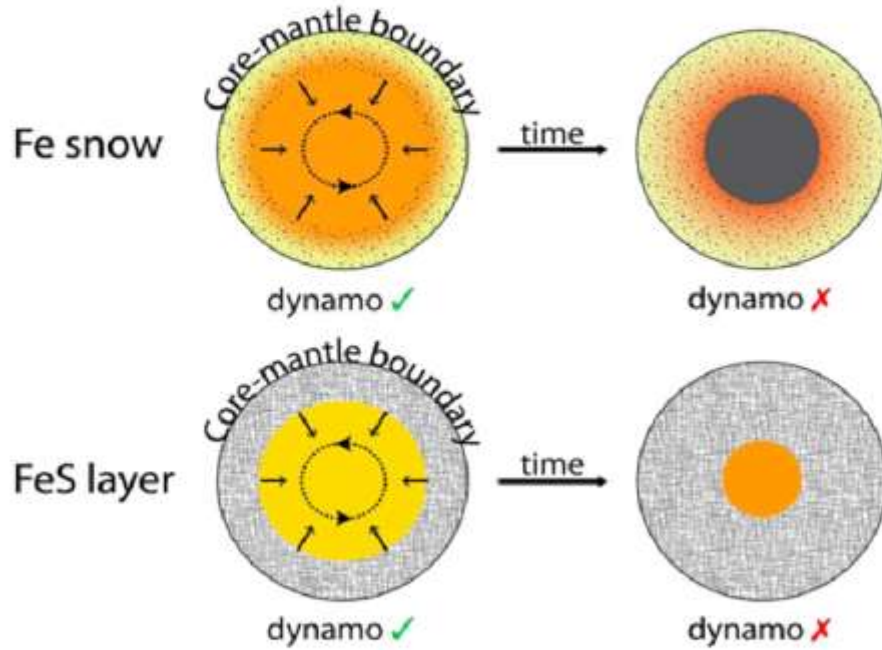
[1] Rückriemen, T. and Breuer, Doris and Spohn, Tilman (2018) Can A Top-down Freezing Core Explain Ganymede’s Magnetic Field. Science Trends. ISSN 2639-1538

(مثل غليان الماء في قدر على الموقد)، أو الحمل الحراري الناتج عن اختلافات التركيب (مثل ترسب الحليب في القهوة). عادةً ما يتشكل الدينامو الحراري خلال المراحل المبكرة جدًا من تطور الكواكب (منذ 4000 إلى 4500 مليون سنة)، لكن استمراره حتى يومنا هذا أصعب بكثير، خاصةً بالنسبة لأجرام كوكبية صغيرة مثل غانيميد. وهذا يُبرز أهمية الحمل الحراري التركيبي لتفسير الدينامو الحالي لغانيميد.

يرتبط الحمل الحراري التركيبي في لب الكواكب غالبًا بتمايز اللب، أي عندما تصبح أجزاء من اللب صلبة، مُطلقةً بذلك عناصر خفيفة طافية. ويُعد وجود هذه العناصر الخفيفة في اللب أمرًا بالغ الأهمية لحدوث الحمل الحراري التركيبي. وقد أظهرت الرصدات الزلزالية للّب الأرض أنه يتكون أساسًا من الحديد أو النيكل وبعض العناصر الخفيفة المُضافة، مثل الكبريت والأكسجين والهيدروجين والسيليكون. وتُعد هذه العناصر وفيرة في النظام الشمسي، ولذلك يُفترض وجودها أيضًا في اللب المعدني لأجرام كوكبية أخرى. وعلى الرغم من أن التركيب الدقيق للّب غير معروف، إلا أن التركيب الأكثر دراسة هو خليط من الحديد والكبريت (Fe-FeS).

التجميد من الأعلى إلى الأسفل في لب غانيميد

بينما يتجمد لب الأرض من الأسفل إلى الأعلى مُشكّلاً لبًا حديديًا صلبًا داخليًا، تشير التجارب التي أُجريت على سبائك الحديد وكبريتيد الحديد تحت ضغط منخفض إلى أن تجميد اللب قد يسير بشكل مختلف تمامًا في الأجرام الكوكبية الصغيرة مثل غانيميد. من المرجح أن يتجمد لب هذه الأجرام الصغيرة من الأعلى إلى الأسفل. وقد بحثت دراسة حديثة أجراها باحثون من مركز الفضاء الألماني (روكريمن، وبروير، وسبون) فيما إذا كان الدينامو الذي يعمل بالتجميد من الأعلى إلى الأسفل يُمكن أن يُفسر المجال المغناطيسي الحالي لغانيميد.




سيناريوهان للتجمد من الأعلى إلى الأسفل: ثلج الحديد (أعلى) وطبقة كبريتيد الحديد (أسفل). تُظهر الصور على اليسار حالات وجود دينامو نشط، بينما تُظهر الصور على اليمين حالات عدم وجود دينامو نشط. تشير المناطق الصفراء والبرتقالية إلى سبيكة ذات لب سائل، حيث تتوافق المناطق الأكثر سطوعًا مع تركيزات كبريت أعلى مقارنةً بالمناطق الداكنة. يمثل اللون الرمادي الداكن الحديد الصلب (أعلى). يوضح الشكل المظلل طبقة كبريتيد الحديد الصلبة (أسفل). تشير الدوائر المتقطعة ذات الأسهم إلى الحمل الحراري التركيبي، الذي يغذي الدينامو

يمكن تصور سيناريوهين مختلفين للتجمد من الأعلى إلى الأسفل، وذلك تبعًا لكمية الكبريت الموجودة في اللب. فإذا كان اللب غنيًا بالحديد، فقد يتشكل الحديد الصلب على هيئة بلورات حرة في قمته (نظام ثلج الحديد). تُسمى المنطقة التي تتشكل فيها بلورات الحديد بمنطقة الثلج. تغوص بلورات الحديد الثقيلة عبر منطقة الثلج حتى تصبح الظروف مواتية لإعادة انصهارها. ويُحدد انصهار الحديد قاع منطقة الثلج. تُحفز بلورات الحديد الثقيلة المنصهرة تيارات الحمل الحراري التركيبية في اللب الأعمق أسفل منطقة الثلج.

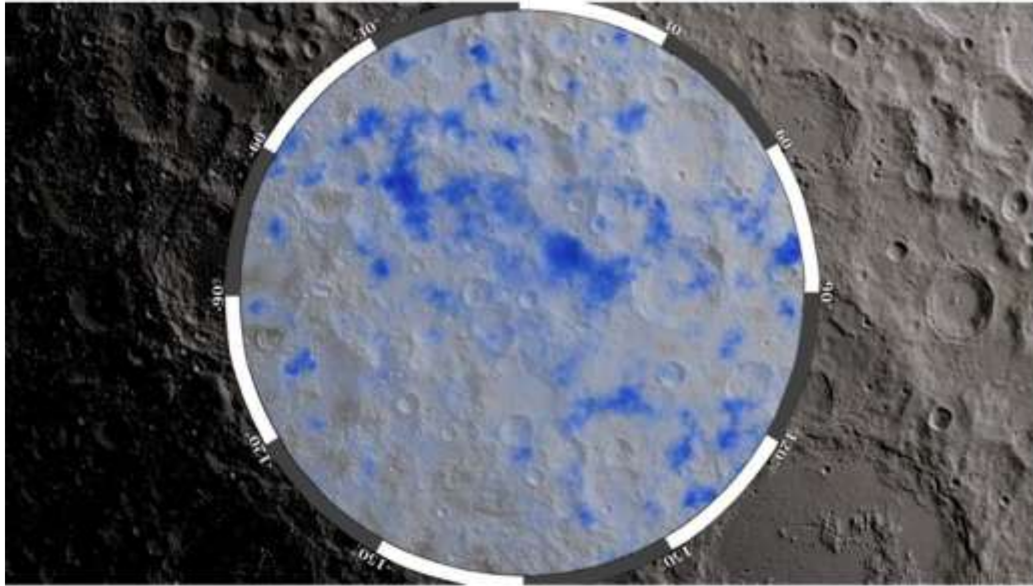
مع استمرار تبريد اللب، تنمو منطقة الثلج على حساب اللب السائل الأعمق، وفي النهاية يتشكل لب حديدي صلب داخلي نتيجة تراكم بلورات الحديد في المركز. ومن خصائص نظام ثلج الحديد أن تيارات الحمل الحراري التركيبية لا تدوم إلا طالما احتاجت منطقة الثلج إلى النمو عبر اللب بأكمله. وهذا يعني أن أقصى عمر للدينامو محدود بنمو منطقة الثلج. إذا كان اللب غنيًا بالكبريت، يتشكل كبريتيد الحديد الصلب (FeS) مكونًا طبقة صلبة في أعلى اللب متصلة بالوشاح الصخري العلوي (نظام طبقة FeS).

يؤدي تشكل هذه الطبقة إلى إطلاق حديد سائل ثقيل عند السطح الفاصل بين الطورين الصلب والسائل، مما يؤدي في النهاية إلى تيارات الحمل الحراري التركيبية في أعماق اللب. نظريًا، يمكن للدينامو المصاحب أن يعمل حتى يصبح اللب بأكمله صلبًا، شريطة توفر طاقة كافية، أي أن تكون تيارات الحمل الحراري التركيبية قوية بما يكفي. ونتيجة لذلك، فإن الدينامو في نظام طبقة FeS ليس مقيدًا زمنيًا كما هو الحال في نظام ثلج الحديد.

## ناسا تؤكد وجود أدلة على تدفق المياه السائلة على سطح المريخ الحالي

قدّمت البيانات التي جمعها جهاز رسم خرائط المعادن القمرية (3M)، الذي حملته مركبة تشاندرايان-1 التابعة لمنظمة أبحاث الفضاء الهندية (ISRO)، للعلماء أول خريطة عالية الدقة للمعادن التي تُكوّن سطح القمر. وقد حُمل هذا الجهاز التابع لوكالة ناسا على متن مهمة تشاندرايان-1 الهندية عام 2009. وكشف تحليل مجموعة البيانات الكاملة من جهاز 3M، الذي أُعلن عنه عام 2018، عن مواقع مؤكدة متعددة للجليد المائي في مناطق القمر المظللة بشكل دائم.

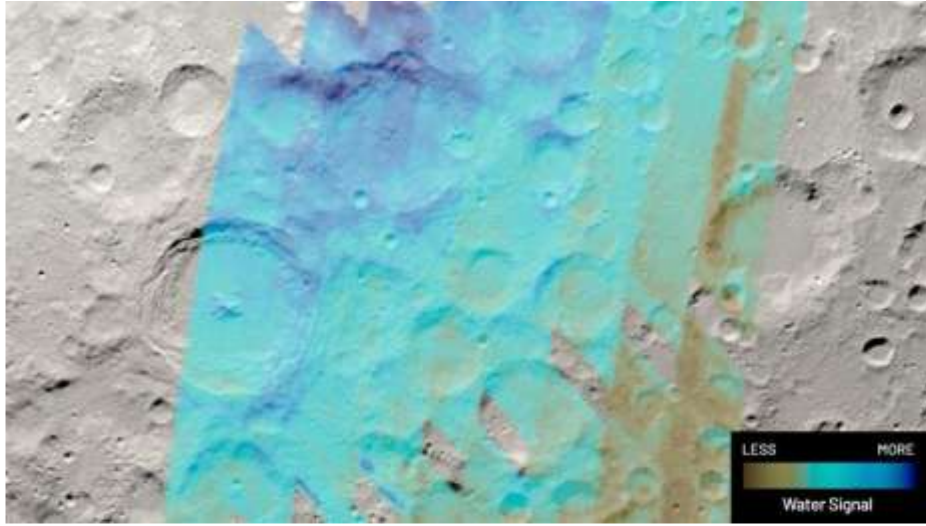
في عام 2020، أعلنت وكالة ناسا اكتشاف الماء على سطح القمر المُضاء بنور الشمس. وكشفت بيانات مرصد ستراتوسفير للأشعة تحت الحمراء (SOFIA) أن الماء في فوهة كلافيس موجود بتركيزات تُعادل تقريبًا تركيز زجاجة ماء سعتها 355 مل (12 أونصة) في متر مكعب من التربة على سطح القمر. وأظهر هذا الاكتشاف أن الماء قد يكون مُوزعًا على سطح القمر، حتى في المناطق المُضاءة بنور الشمس، وليس محصورًا في المناطق الباردة والمظلمة.



مناطق القطب الجنوبي للقمر التي يُحتمل وجود رواسب جليدية مائية فيها، موضحة باللون الأزرق.
تستند الخريطة إلى بيانات التقطها مسبار استطلاع القمر المداري التابع NASA

## أول خريطة تفصيلية واسعة النطاق للمياه على سطح القمر (2023)

في عام 2023، قدمت خريطة جديدة لتوزيع المياه على سطح القمر مؤشرات حول كيفية تحرك المياه على سطحه. تمتد هذه الخريطة، التي أُعدت باستخدام بيانات مرصد SOFIA، إلى القطب الجنوبي للقمر، وهي المنطقة المستهدفة للدراسة في مهمات أرتميس التابعة لناسا، ومركبة فايبر الجوالة المتخصصة في البحث عن المياه.




أكد الباحثون وجود الماء على سطح القمر، سواءً كان مُضاءً بنور الشمس أو مُظللاً، إلا أن العديد من التساؤلات لا تزال قائمة. ويواصل علماء القمر دراسة أصول الماء وسلوكه. وتشير الأدلة إلى أن الماء على سطح القمر ناتج عن اصطدامات المذنبات القديمة والحالية، واصطدام النيازك الجليدية الدقيقة بسطح القمر، وتفاعل غبار القمر مع الرياح الشمسية. ومع ذلك، لا يزال هناك حاجة إلى مزيد من البحث لفهم تاريخ الماء على سطح القمر وحاضره ومستقبله بشكل كامل.

بروفيدنس، رود آيلاند PROVIDENCE, R.I. [جامعة براون Brown University] - كشفت دراسة جديدة لبيانات الأقمار الصناعية[1] أن العديد من الرواسب البركانية المنتشرة على سطح القمر تحتوي على كميات كبيرة بشكل غير معتاد من المياه المحتبسة مقارنةً بالمناطق المحيطة بها. ويُعزز اكتشاف الماء في هذه الرواسب

[1] ) https://www.brown.edu/news/2017-07-24/moonwater

القديمة، التي يُعتقد أنها تتكون من حبيبات زجاجية تشكلت نتيجة الانفجار الهائل للصهارة القادمة من أعماق القمر، فكرة أن غلاف القمر غنيٌّ بالماء بشكلٍ مُثير للدهشة.

كان العلماء قد افترضوا لسنوات أن باطن القمر قد استُنفد إلى حد كبير من الماء والمركبات المتطايرة الأخرى. بدأ هذا التصور بالتغير في عام 2008، عندما اكتشف فريق بحثي، من بينهم الجيولوجي ألبرتو سال من جامعة براون، آثارًا ضئيلة من الماء في بعض الحبيبات الزجاجية البركانية التي جُلبت إلى الأرض من مهمتي أبولو 15 و17 إلى القمر. وفي عام 2011، كشفت دراسة إضافية للتكوينات البلورية الدقيقة داخل تلك الحبيبات أنها تحتوي في الواقع على كميات من الماء تُشابه تلك الموجودة في بعض أنواع البازلت على الأرض. يشير ذلك إلى أن غلاف القمر - أجزاء منه على الأقل - يحتوي على كمية من الماء تضاهي تلك الموجودة في غلاف الأرض.

يقول رالف ميليكن، المؤلف الرئيسي للدراسة الجديدة والأستاذ المشارك في قسم علوم الأرض والبيئة والكواكب بجامعة براون: "السؤال الأساسي هو ما إذا كانت عينات أبولو تمثل الظروف العامة لباطن القمر، أم أنها تمثل مناطق غير عادية أو ربما شاذة غنية بالماء ضمن غلاف جاف في الأصل". ويضيف: "من خلال تحليل البيانات المدارية، يمكننا دراسة الرواسب البركانية الفتاتية الكبيرة على سطح القمر التي لم تُجمع عينات منها خلال مهمتي أبولو أو لونا. وحقيقة أن جميعها تقريبًا تُظهر آثارًا للماء تشير إلى أن عينات أبولو ليست شاذة، وبالتالي قد يكون باطن القمر رطبًا".

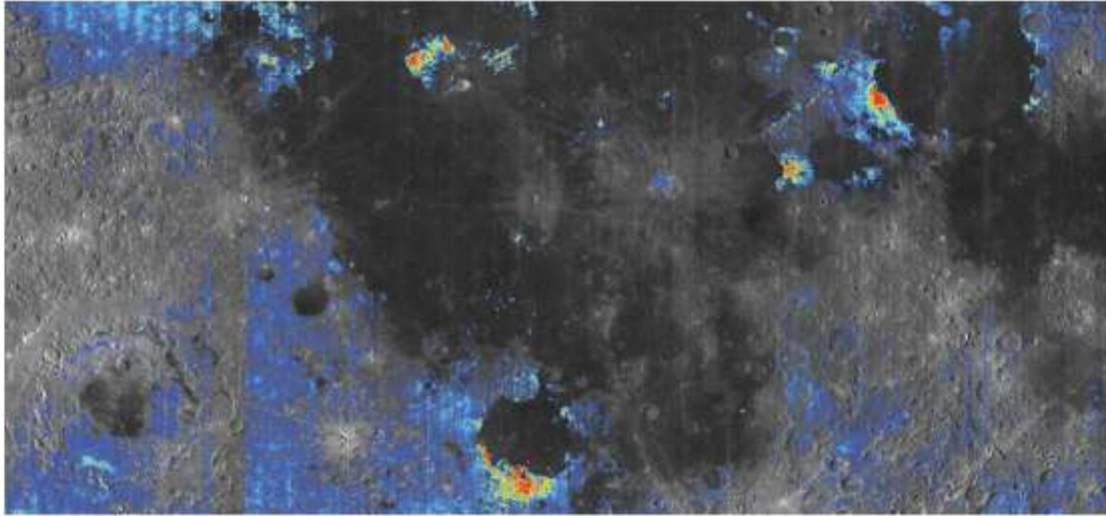
نُشرت الدراسة، التي شارك في تأليفها ميليكن مع شواي لي، الباحث ما بعد الدكتوراه في جامعة هاواي والحاصل مؤخرًا على درجة الدكتوراه من جامعة براون، في مجلة "نيتشر جيوساينس". وكان هذا العمل جزءًا من أطروحة الدكتوراه التي قدمها لي. أطروحة. إنّ الكشف عن محتوى الماء في الرواسب البركانية القمرية باستخدام الأجهزة المدارية ليس بالأمر الهيّن. يستخدم العلماء مطيافات مدارية لقياس الضوء المنعكس عن سطح الكوكب. ومن خلال دراسة أطوال موجات الضوء التي يمتصها أو ينعكسها السطح، يستطيع العلماء تكوين فكرة عن المعادن والمركبات الأخرى الموجودة.

تكمن المشكلة في أن سطح القمر يسخن خلال اليوم، وخاصة عند خطوط العرض التي تتواجد فيها هذه الرواسب البركانية الفتاتية. وهذا يعني أنه بالإضافة إلى الضوء المنعكس من السطح، يقيس المطياف الحرارة

أيضًا. يقول ميليكين: "يحدث هذا الإشعاع الحراري عند نفس أطوال الموجات التي نحتاجها للبحث عن الماء. لذا، لكي نؤكد وجود الماء بثقة، علينا أولًا مراعاة وإزالة المكون الحراري المنبعث."

لتحقيق ذلك، استخدم لي وميلكين قياسات مخبرية لعينات جُلبت من مهمات أبولو، بالإضافة إلى بيانات تفصيلية عن درجات الحرارة في المناطق المستهدفة على سطح القمر. وباستخدام التصحيح الحراري الجديد، فحص الباحثان بيانات من جهاز رسم خرائط المعادن القمرية، وهو مطياف تصويري حُمِل على متن مركبة تشاندرايان-1 القمرية الهندية.

وجد الباحثان أدلة على وجود الماء في جميع الرواسب البركانية الفتاتية الكبيرة تقريبًا التي رُسمت خرائطها سابقًا على سطح القمر، بما في ذلك الرواسب القريبة من مواقع هبوط أبولو 15 و17 حيث جُمعت عينات الخرز الزجاجي الحاملة للماء.



تشير المناطق الملونة إلى ارتفاع نسبة المياه مقارنةً بالمناطق المحيطة. ويشير اللونان الأصفر والأحمر إلى أعلى نسبة من المياه. مختبر ميلكين / جامعة براون

قال ميليكين: "إن توزيع هذه الرواسب الغنية بالماء هو الأمر الأساسي. فهي منتشرة على سطح القمر، مما يدل على أن الماء الموجود في عينات أبولو ليس حالةً فريدة. ويبدو أن المواد البركانية القمرية غنية بالماء بشكل عام، مما يوحي بأن الأمر نفسه قد ينطبق على الوشاح". وتثير فكرة غنى باطن القمر بالماء تساؤلات مثيرة للاهتمام حول تكوينه. يعتقد العلماء أن القمر تشكل من حطام خلفه جسم بحجم المريخ تقريبًا اصطدم بالأرض في

بدايات تاريخ النظام الشمسي. ومن الأسباب التي دفعت العلماء إلى افتراض جفاف باطن القمر هو أنه من غير المرجح أن يكون أي من الهيدروجين اللازم لتكوين الماء قد نجا من حرارة ذلك الاصطدام.

وأضاف لي: "تشير الأدلة المتزايدة على وجود الماء داخل القمر إلى أن الماء قد نجا بطريقة ما، أو أنه وصل إلى القمر بعد الاصطدام بفترة وجيزة بواسطة الكويكبات أو المذنبات قبل أن يتصلب القمر تمامًا. ولا يزال الأصل الدقيق للماء في باطن القمر سؤالًا مهمًا". إضافةً إلى تسليط الضوء على دور الماء في النظام الشمسي المبكر، قد يكون لهذا البحث آثارٌ على استكشاف القمر في المستقبل. لا تحتوي الحبيبات البركانية على كمية كبيرة من الماء - حوالي 0.05% من وزنها، وفقًا للباحثين - لكن الرواسب كبيرة، ومن المحتمل استخراج الماء منها.

وقال لي: "أشارت دراسات أخرى إلى وجود جليد مائي في المناطق المظللة عند قطبي القمر، لكن الرواسب البركانية الفتاتية تقع في مواقع قد يسهل الوصول إليها. أي شيء يُجنّب رواد استكشاف القمر في المستقبل عناء جلب كميات كبيرة من الماء من الأرض يُعدّ خطوةً كبيرةً إلى الأمام، ونتائجنا تُشير إلى بديل جديد".

## كيف يمكن صنع مكونات الماء على سطح القمر

عندما تهب رياح شمسية[1] مشحونة على سطح القمر بسرعة 450 كيلومترًا في الثانية (أو ما يقارب مليون ميل في الساعة)، فإنها تُغني سطح القمر بمكوناتٍ قد تُكوّن الماء، وفقًا لما اكتشفه علماء ناسا. باستخدام برنامج حاسوبي، قام العلماء بمحاكاة التفاعلات الكيميائية التي تحدث عندما تضرب الرياح الشمسية سطح القمر. ووجدوا أنه مع تدفق البروتونات من الشمس إلى القمر، تتفاعل هذه الجسيمات مع الإلكترونات على سطح القمر، مُكوّنةً ذرات الهيدروجين (H). ثم تنتقل هذه الذرات عبر السطح وترتبط بذرات الأكسجين (O) الوفيرة الموجودة في السيليكا ($SiO_2$) وجزيئات أخرى حاملة للأكسجين تُكوّن التربة القمرية، أو ما يُعرف بالريغوليث. ويتحد الهيدروجين والأكسجين لتكوين جزيء الهيدروكسيل (OH)، وهو أحد مكونات الماء، أو $H_2O$.

قال ويليام إم. فاريل William M. Farrell، عالم فيزياء البلازما في مركز غودارد لرحلات الفضاء التابع لناسا في غرينبيلت، ميريلاند، والذي ساهم في تطوير المحاكاة: "نتصور الماء كمركب سحري مميز. لكن الأمر المذهل هو أن كل صخرة لديها القدرة على إنتاج الماء، خاصة بعد تعرضها لإشعاع الرياح الشمسية". وأوضح أورينثال جيمس تاكر Orenthal James Tucker، عالم الفيزياء في غودارد الذي قاد أبحاث المحاكاة، أن فهم كمية الماء - أو مكوناته الكيميائية - المتوفرة على سطح القمر أمر بالغ الأهمية لتحقيق هدف ناسا المتمثل في إرسال بشر لإقامة وجود دائم هناك.

وأضاف تاكر، الذي نشر مؤخرًا نتائج المحاكاة في مجلة JGR Planets: "نسعى إلى فهم ديناميكيات انتقال الموارد القيّمة، مثل الهيدروجين، حول سطح القمر وعبر غلافه الخارجي، أو غلافه الجوي الرقيق جدًا، حتى نتمكن من تحديد أماكن استخراج هذه الموارد".

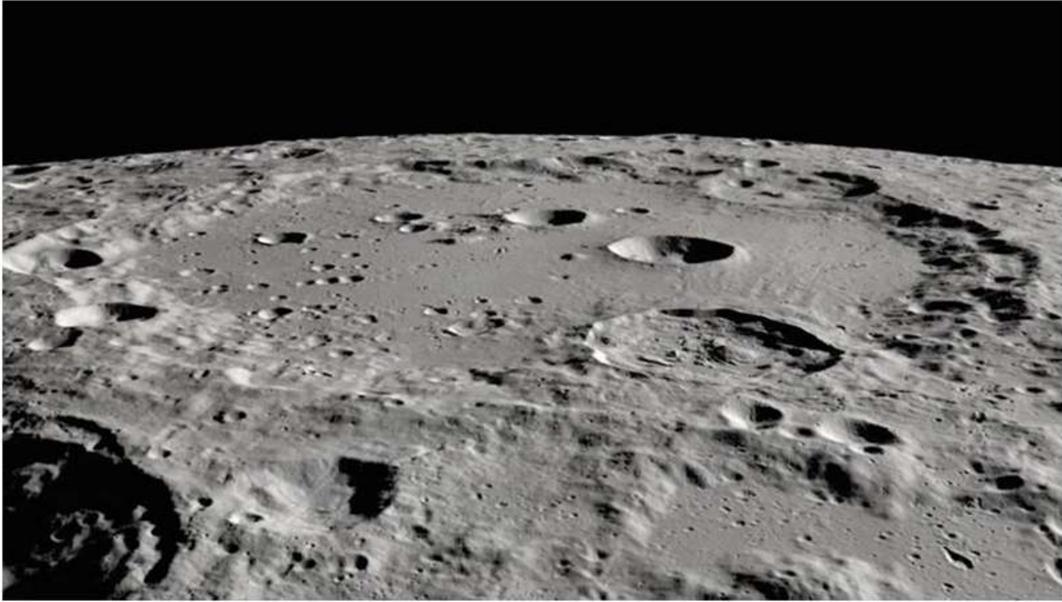
استخدمت عدة مركبات فضائية أجهزة تعمل بالأشعة تحت الحمراء لقياس الضوء المنبعث من القمر، وذلك لتحديد التركيب الكيميائي لسطحه. من بين هذه المركبات مركبة "ديب إمباكت" التابعة لناسا، والتي اقتربت عدة مرات من نظام الأرض والقمر في طريقها إلى المذنب 103P/Hartley 2؛ ومركبة "كاسيني" التابعة لناسا NASA's Cassinispacecraft، والتي مرت بالقرب من القمر في طريقها إلى زحل؛ ومركبة "تشاندرايان-1"

[1] ( https://science.nasa.gov/solar-system/how-ingredients-for-water-could-be-made-on-the-surface-of-moon

الهندية، التي دارت حول القمر قبل عقد من الزمن. وقد عثرت جميعها على أدلة لوجود الماء أو مكوناته (الهيدروجين أو الهيدروكسيل).

في أواخر العقد الأول من الألفية الثانية[1]، رصدت عدة بعثات فضائية، من بينها تشاندرايان-1 التابعة لمنظمة أبحاث الفضاء الهندية، وكاسيني وديب إمباكت التابعتين لناسا، وجود رطوبة على سطح القمر، إلا أن هذه البعثات لم تتمكن من تحديد ما إذا كانت الإشارات تعود إلى أيونات الهيدروكسيل (OH) أو الماء ($H_2O$). في الفترة نفسها، وباستخدام معدات مخبرية فائقة الدقة، عثر العلماء على جزيئات ماء محصورة داخل الزجاج والمعادن في العينات التي جمعتها بعثات أبولو.

ومنذ ذلك الحين، رصدت بعثات عديدة أخرى وجود رطوبة مماثلة، بما في ذلك مركبة استطلاع القمر المدارية (LRCOR) وبعثة LCROSS. وتأتي غالبية هذه الإشارات من مناطق مظللة بشكل دائم، وهي فوهات تقع عند قطبي القمر ولا تصلها أشعة الشمس. وتتميز هذه المناطق ببرودتها الشديدة التي تجعل الماء محصورًا داخلها ولا يتبخر. وفي عام 2019، كشفت بيانات من مهمة LADEE عن وجود أيونات الهيدروكسيل (OH) و/أو الماء ($H_2O$) على سطح القمر، خارج المناطق المظللة بشكل دائم، وأنها تُقذف عبر اصطدامات النيازك الدقيقة.



**Clavius Crater on the Moon NASA/USGS**

[1] ( /https://science.nasa.gov/solar-system/moon/theres-water-on-the-moon

## هل يوجد ماء على سطح القمر؟ دراسة جديدة تحدد المواقع الأكثر احتمالاً

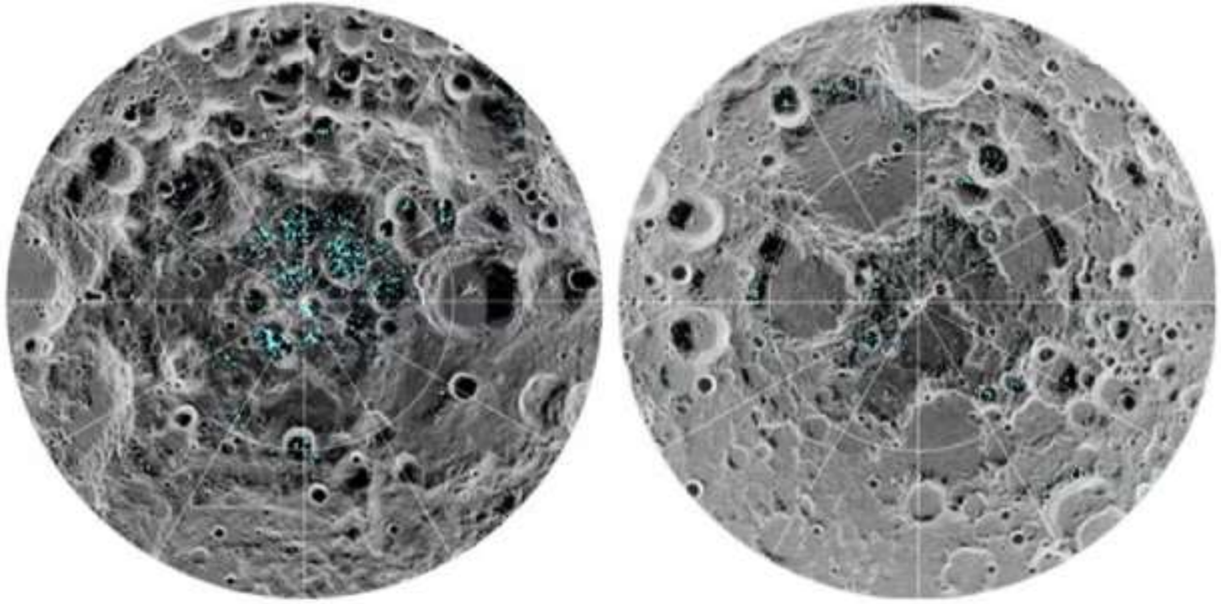
رجّحت دراسة جديدة أجراها فريق دولي من العلماء[1] أن الماء تراكم على سطح القمر ببطء على مدى مليارات السنين، وليس خلال حدث جلل واحد. ونشر الباحثون، ومن بينهم بول هاين، عالم الكواكب في مختبر فيزياء الغلاف الجوي والفضاء (LASP) بجامعة كولورادو بولدر Colorado Boulder، نتائج دراستهم في السابع من أبريل في مجلة "نيتشر أسترونومي Nature Astronomy".

وتتناول الدراسة لغزًا قمريًا حيّر العلماء لعقود. فقد قدّمت رصدات من بعثات ناسا ومصادر أخرى تلميحات مثيرة للاهتمام حول احتمال وجود الماء بوفرة على سطح القمر، حيث يتجمع على شكل جليد في الفوهات العميقة المظلمة المحيطة بالقطب الجنوبي للقمر. لكن كيف وصل هذا الجليد إلى هناك، أو لماذا يبدو أنه موجود في بعض الفوهات دون غيرها، لم يكن واضحًا.

لم تتمكن نتائج الفريق من تحديد المصدر بدقة، لكنها استبعدت بعض الاحتمالات، بما في ذلك وصول الماء إلى القمر دفعة واحدة مع اصطدام مذنب ضخم بسطحه. يقول هاين، الأستاذ المشارك في قسم الفيزياء الفلكية وعلوم الكواكب: "يبدو أن أقدم فوهات القمر تحتوي على أكبر كمية من الجليد. وهذا يعني أن القمر كان يجمع الماء بشكل شبه مستمر لمدة تصل إلى 3 أو 3.5 مليار سنة".

ويضيف هاين أن وجود الماء على سطح القمر سيكون كنزًا ثمينًا لرواد الفضاء. إذ يمكن لمستكشفي القمر في المستقبل استخراج الجليد للحصول على مياه الشرب، أو حتى لإنتاج وقود الصواريخ عن طريق فصل ذرات الهيدروجين والأكسجين. ويقول عوديد أهارونسون، المؤلف الرئيسي للدراسة وعالم الكواكب في معهد وايزمان للعلوم في إسرائيل Weizmann: "يُعدّ العثور على الماء خارج الأرض في صورة سائلة وقابلة للاستخدام أحد أهم التحديات في علم الفلك".

[1] ) https://www.colorado.edu/today/2026/04/07/water-moon-new-study-narrows-down-most-likely-locations



**مواقع الجليد، باللون الأزرق، عند القطب الجنوبي للقمر، على اليسار، والقطب الشمالي، على اليمين، كما رصدتها المركبة الفضائية Chandrayaan-1**

الظلال القمرية الدائمة، ذكر هاين Hayne عدة مصادر محتملة لمياه القمر: ربما نقلت البراكين في الماضي البعيد المياه من أعماق القمر إلى سطحه. كما يُحتمل أن تكون المياه قد وصلت إلى القمر على متن المذنبات أو الكويكبات، وربما وصلت عبر الرياح الشمسية - وهي تيار مستمر من الجسيمات المشحونة يتدفق بعيدًا عن الشمس باتجاه النظام الشمسي. وقال هاين: "عبر الرياح الشمسية، يقصف تيار مستمر من الهيدروجين القمر، ويمكن تحويل بعض هذا الهيدروجين إلى ماء على سطحه".

وبغض النظر عن مصدر المياه، فإن علماء مثل هاين على يقين تام بأن الجليد قد تراكم فيما يُعرف بـ"المصائد الباردة" - وهي فوهات على سطح القمر تقع في ظل دائم ولم ترَ الشمس منذ مليارات السنين في بعض الحالات. رصدت أجهزة مشروع رسم خرائط خط لايمان ألفا (Lyman Alpha (LAMP على متن مركبة استطلاع القمر المدارية التابعة لناسا (LRO)، والتي أُطلقت عام ٢٠٠٩، أدلةً على وجود ما قد يكون جليدًا في بعض تلك الفوهات. وقال هاين: "من الواضح أن الجليد يتوزع بشكل غير منتظم، فهو لا يتركز بكميات متساوية في كل فوهة، ولم يكن هناك تفسير واضح لذلك".

كمية الماء على سطح القمر أقل من كمية الماء في صخور الأرض السيليكاتية، ولكن يُعتقد أنها نشأت من المصدر نفسه. وقد طُرح سيناريوهان لتفسير كيفية اندماج هذا الماء الأصلي في القمر. ربما احتُفظ بالماء جزئيًا في

القرص القمري الأولي أثناء تكوين القمر. وقد يكون التجزئة المتوازنة أثناء تبخر الماء هي العملية الأساسية التي أدت إلى تجزئة نظائر الهيدروجين في القرص القمري الأولي. بدلاً من ذلك، ربما يكون هذا الماء المرصود في باطن القمر قد تراكم في القمر خلال مرحلته المنصهرة عند حوالي 4.5-4.3 مليار سنة. ولاختبار هاتين الفرضيتين، قد يلزم ثلاثة أنواع مختلفة من البيانات الجديدة، بما في ذلك المحتوى المائي الدقيق وتركيب نظائر الهيدروجين في القمر المبكر، والشذوذات النظيرية للعناصر المحبة للحديد في القمر، ومعاملات التجزئة المتوازنة لنظائر الهيدروجين عند ضغوط مختلفة. ومع ذلك، فإن تقييم هذين المقترحين يمكن أن يحد من الظروف الفيزيائية والكيميائية في القرص القمري الأولي أثناء تكوين القمر[1].

[1] ) Hejiu Hui , Ziyan Han , Kang Shuai, Origin of water in the Moon, National Science Review, Volume 11, Issue 6, June 2024, nwae151

## الجليد على كوكب عطارد

يقع عطارد، أقرب الكواكب إلى الشمس، في قلب منطقة شديدة الحرارة، حيث تصل درجات الحرارة إلى 800 درجة فهرنهايت. مع ذلك، تبقى بعض المناطق عند قطبيه الشمالي والجنوبي شديدة البرودة، لدرجة أن العلماء شكّوا لفترة طويلة في وجود جليد على هذا الكوكب الذي تجتاحه الشمس. وبالفعل، في عام 2012، أفادت مهمة ناسا "ميسنجر" (MESSENGER) (سطح عطارد، بيئة الفضاء، الجيوكيمياء، والمدى) باكتشاف رواسب من الجليد ومواد كيميائية متجمدة عند القطب الشمالي لعطارد. صحيح أن عطارد لا يمتلك غطاءً جليديًا مثل غطاء الأرض، ولكن لو جُمعت كل هذه الرواسب، لكانت كافية لتغطية مدينة واشنطن العاصمة بطبقة من الجليد سمكها ميلان. شاهد الرسوم المتحركة لتتعرف على مدى ظلمة القطب الشمالي لعطارد، خاصة في الفوهات العميقة حيث قد لا تصل أشعة الشمس أبدًا.

لطالما أثارت البقع المضيئة على سطح عطارد فضول علماء الفلك[1]. فقد بدت هذه البقع اللامعة في السابق قطعًا من الجليد. جاءت الأدلة الجديدة على وجود الجليد على سطح عطارد من مركبة فضائية تابعة لناسا، تدور حول الكوكب منذ مارس 2011. اسم المركبة، MESSENGER، اختصار لـ"سطح عطارد، البيئة الفضائية، الجيوكيمياء، والمدى".

رصد العلماء لأول مرة البقع المضيئة قرب قطبي عطارد في تسعينيات القرن الماضي، حيث كانت البيانات آنذاك مستقاة من أجهزة أرضية. ولإجراء دراسات جديدة على هذه البقع قرب القطب الشمالي للكوكب، استخدم العلماء جهازاً على متن MESSENGER يُسمى مقياس الارتفاع الليزري. يُطلق هذا الجهاز شعاع ليزر على سطح الكوكب، ثم يقيس كمية الضوء المنعكس والمدة الزمنية التي يستغرقها. يمكن استخدام هذه القياسات لرسم خرائط القمم والوديان والفوهات على سطح الكوكب. كما تكشف عن أكثر البقع سطوعًا عليه. ويبدو الجليد عاكسًا للضوء وساطعًا بشكل خاص للأجهزة.

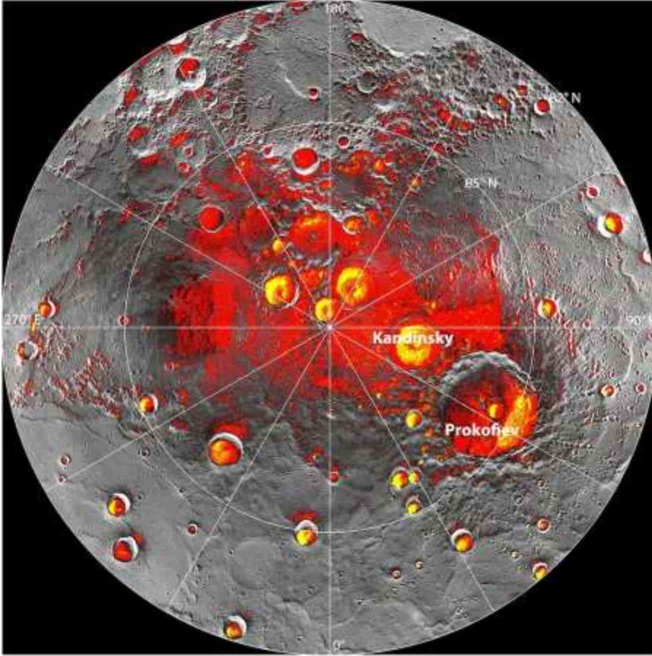
صمّم بايج Paige وزملاؤه نماذج حاسوبية لدمج البيانات المتعلقة بالقطب الشمالي لعطارد، والتي تُرسلها مركبة MESSENGER، مع بيانات من التلسكوبات الأرضية. النموذج الحاسوبي هو برنامج يجمع البيانات الموجودة حول شيء ما لتكوين صورة أشمل، مثل التنبؤ بالحلول المختلفة المحتملة للغز كبير لا تملك سوى عدد قليل

[1] Lewis. "First rock from the sun turns out to have ice." Science News. Nov. 30, 2012 (

من قطعه. يستطيع العلماء استخدام النماذج الحاسوبية لإجراء الحسابات، واختبار الأفكار، أو وضع التنبؤات. في هذه الحالة، تطابق النموذج الحاسوبي لعطارد تمامًا مع ملاحظات MESSENGER.

وقال بايج لمجلة ساينس نيوز: "نرى بالفعل جليدًا ساطعًا في كل مكان نتوقع رؤيته فيه". تُظهر قياسات مركبة MESSENGER أن درجة الحرارة في الفوهات المظلمة قرب القطب الشمالي لعطارد - وهي المنطقة نفسها التي رُصدت فيها بقع ساطعة - تنخفض إلى ما دون -173 درجة مئوية (-279 درجة فهرنهايت). ولأن ميل عطارد ضئيل جدًا أثناء دورانه حول الشمس، فإن أشعة الشمس لا تصل أبدًا إلى داخل الفوهات القريبة من قطبي الكوكب. لذا، يبقى أي جليد هناك متجمدًا.

وأشارت قياسات المناطق الداكنة قرب القطب إلى احتمال وجود المزيد من الجليد، وإن كان مدفونًا. وقدّمت البيانات التي جمعها جهاز آخر على متن MESSENGER، يُسمى مطياف النيوترونات، أدلة إضافية على وجود الجليد المدفون، والذي يُغطيه مادة داكنة غامضة. وتُظهر صور MESSENGER أن القطب الجنوبي له سمات مماثلة - وربما يحتوي أيضًا على جليد.




الصورة الموضحة تيظهر فيها منطقة القطب الشمالي لعطارد مناطق مظللة (باللون الأحمر) وفقًا لبيانات جديدة من مركبة MESSENGER، وموقع البقع الساطعة (باللون الأصفر) التي يُحتمل أن تكون رواسب جليدية مكشوفة.

## تلسكوبات ناسا تعثر على بخار الماء على كوكب نبتون الخارجي

اكتشف علماء الفلك، باستخدام بيانات من ثلاثة تلسكوبات فضائية تابعة لناسا[1] – هابل Hubble، سبيتزر Spitzer، وكبلر Kepler- سماءً صافية وبخار ماء كثيف على كوكب غازي خارج نظامنا الشمسي. يبلغ حجم هذا الكوكب تقريبًا حجم نبتون، مما يجعله أصغر كوكب تم رصد جزيئات من أي نوع عليه.

وقال جون غرونسفيلد، مساعد مدير إدارة المهام العلمية في ناسا بواشنطن: "يمثل هذا الاكتشاف علامة فارقة على طريق تحليل التركيب الجوي للكواكب الصخرية الأصغر حجمًا، والتي تشبه الأرض إلى حد كبير. لم يكن تحقيق مثل هذه الإنجازات ممكنًا اليوم إلا بفضل القدرات المشتركة لهذه المراصد الفريدة والقوية".يمكن أن تحجب السحب في أغلفة الكواكب الجوية رؤية الجزيئات الكامنة التي تكشف معلومات عن تركيب الكواكب وتاريخها. ويُعدّ اكتشاف سماء صافية على كوكب بحجم نبتون مؤشرًا جيدًا على أن الكواكب الأصغر قد تتمتع برؤية مماثلة.

قال جوناثان فرين Jonathan Fraine من جامعة ميريلاند، كوليدج بارك، المؤلف الرئيسي لدراسة جديدة نُشرت في مجلة نيتشر: "عندما يرصد الفلكيون الأجرام السماوية ليلاً باستخدام التلسكوبات، يقولون "سماء صافية" كرمز للتفاؤل. في هذه الحالة، وجدنا سماءً صافية على كوكب بعيد. وهذا يُعدّ فألاً حسناً لنا، لأنه يعني أن الغيوم لم تحجب رؤيتنا لجزيئات الماء".

الكوكب، HAT-P-11b، هو ما يُعرف بكوكب نبتون خارجي - أي كوكب بحجم نبتون يدور حول نجم آخر. يقع على بُعد 120 سنة ضوئية في كوكبة الدجاجة. على عكس نبتون، يدور هذا الكوكب حول نجمه على مسافة أقرب، مُكملاً دورة كاملة كل خمسة أيام تقريباً. وهو عالم دافئ يُعتقد أن له نواة صخرية وغلافاً جوياً غازياً. لم يكن معروفاً الكثير عن تكوين هذا الكوكب، أو عن كواكب نبتون الخارجية الأخرى المشابهة له، حتى الآن.

يُعدّ حجم الكواكب أحد التحديات الرئيسية في تحليل أغلفة هذه الكواكب. فالكواكب الأكبر حجمًا، الشبيهة بكوكب المشتري، يسهل رصدها نظرًا لحجمها الهائل وغلافها الجوي الكثيف نسبيًا. في الواقع، تمكّن الباحثون

[1] https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-telescopes-find-clear-skies-and-water-vapor-on-exo-neptune/

بالفعل من رصد بخار الماء في هذه الكواكب. أما الكواكب الأصغر حجمًا، فيصعب دراستها، فضلًا عن أن جميع الكواكب التي رُصدت حتى الآن بدت غائمة.

في الدراسة الجديدة، شرع علماء الفلك في دراسة الغلاف الجوي للكوكب HAT-P-11b، دون معرفة ما إذا كان طقسه سيشهد غيومًا أم لا. استخدموا كاميرا المجال الواسع 3 التابعة لتلسكوب هابل، وتقنية تُسمى مطيافية النقل، حيث يُرصد الكوكب أثناء عبوره أمام نجمه الأم. يتسلل ضوء النجوم عبر حافة الغلاف الجوي للكوكب إلى عدسة التلسكوب. إذا وُجدت جزيئات مثل بخار الماء، فإنها تمتص جزءًا من ضوء النجوم، تاركةً بصمات مميزة في الضوء الذي يصل إلى تلسكوباتنا.

## ناسا تحدد وجود ماء متجمد في نظام نجمي شاب

أكد باحثون وجود جليد مائي بلوري في قرص من الحطام الغباري يدور حول نجم شبيه بالشمس[1] على بُعد 155 سنة ضوئية، وذلك باستخدام بيانات طيفية مفصلة من تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا. (يُشير مصطلح "جليد مائي" إلى تركيبه، إذ تُلاحَظ جزيئات متجمدة أخرى كثيرة في الفضاء، مثل جليد ثاني أكسيد الكربون، أو "الجليد الجاف"). في عام 2008، أشارت بيانات من تلسكوب سبيتزر الفضائي التابع لناسا، والذي توقف عن العمل، إلى احتمال وجود ماء متجمد في هذا النظام.

وقال تشين شي Chen Xie ، المؤلف الرئيسي للدراسة الجديدة وباحث مساعد في جامعة جونز هوبكنز Johns Hopkins في بالتيمور، ميريلاند: Baltimore, Maryland"رصد ويب بوضوح ليس فقط جليدًا مائيًا، بل جليدًا مائيًا بلوريًا، وهو موجود أيضًا في مواقع مثل حلقات زحل والأجرام الجليدية في حزام كايبر في نظامنا الشمسي". جميع جزيئات الماء المتجمد التي رصدها ويب Webb مُقترنة بجزيئات غبار دقيقة منتشرة في جميع أنحاء القرص - أشبه بكرات ثلجية صغيرة جدًا. نُشرت النتائج يوم الأربعاء في مجلة نيتشر.

انتظر علماء الفلك هذه البيانات الحاسمة لعقود. تقول كريستين تشين، الباحثة المشاركة وعالمة الفلك في معهد علوم تلسكوب الفضاء في بالتيمور: "عندما كنت طالبة دراسات عليا قبل 25 عامًا، أخبرني مشرفي بوجود جليد في أقراص الحطام، ولكن قبل تلسكوب جيمس ويب الفضائي، لم تكن لدينا أجهزة حساسة بما يكفي لإجراء هذه الملاحظات". وتضيف: "الأمر الأكثر إثارة للدهشة هو أن هذه البيانات تبدو مشابهة لملاحظات التلسكوب الحديثة الأخرى لأجرام حزام كايبر في نظامنا الشمسي".

يُعدّ جليد الماء عنصرًا حيويًا في الأقراص المحيطة بالنجوم الفتية، فهو يؤثر بشكل كبير على تكوين الكواكب العملاقة، وقد يُنقل أيضًا بواسطة أجرام صغيرة كالمذنبات والكويكبات إلى الكواكب الصخرية المكتملة التكوين. والآن، بعد أن رصد الباحثون جليد الماء بواسطة تلسكوب جيمس ويب الفضائي، فقد فتحوا المجال أمام جميع الباحثين لدراسة كيفية حدوث هذه العمليات بطرق جديدة في العديد من الأنظمة الكوكبية الأخرى.

---

[1] ( https://science.nasa.gov/missions/webb/another-first-nasa-webb-identifies-frozen-water-in-young-star-/system




**Image: Debris Disk Around Star HD 181327 - NASA, ESA, CSA, Ralf Crawford (STScI)**

أكد باحثون وجود جليد مائي بلوري في قرص من الحطام الغباري يدور حول نجم شبيه بالشمس، وذلك باستخدام تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا. وقد وُجد أن جميع المياه المتجمدة التي رصدها ويب مرتبطة بجزيئات غبار دقيقة منتشرة في جميع أنحاء القرص. وتركز معظم الجليد المائي المرصود في المناطق الأبرد والأبعد عن النجم. وكلما اقترب الباحثون من النجم، قلّ الجليد المائي الذي عثروا عليه.

النجم، المصنف تحت اسم HD 181327، أصغر بكثير من شمسنا. يُقدّر عمره بنحو 23 مليون سنة، مقارنةً بعمر الشمس البالغ 4.6 مليار سنة. يُعدّ هذا النجم أكبر كتلةً من الشمس، وأكثر حرارةً، مما أدى إلى تكوّن نظام نجمي أكبر قليلاً حوله. تؤكد رصدات تلسكوب جيمس ويب وجود فجوة كبيرة بين النجم وقرص الحطام المحيط به - وهي منطقة واسعة خالية من الغبار. في المناطق الأبعد، يُشبه قرص الحطام حزام كايبر في نظامنا الشمسي، حيث توجد الكواكب القزمة والمذنبات وقطع أخرى من الجليد والصخور (والتي تتصادم أحيانًا مع بعضها البعض). قبل مليارات السنين، كان حزام كايبر على الأرجح مشابهًا لقرص الحطام المحيط بهذا النجم.

يقول تشين: "يُعدّ HD 181327 نظامًا نشطًا للغاية. تحدث تصادمات منتظمة ومستمرة في قرص الحطام المحيط به. عندما تتصادم هذه الأجسام الجليدية، تُطلق جزيئات دقيقة من جليد الماء المُغبر، وهي ذات حجم مثالي لرصدها بواسطة تلسكوب ويب". لا يتوزع جليد الماء بالتساوي في هذا النظام. يتركز معظمه في المناطق الأبرد والأبعد عن النجم. يقول شي: "تتكون المنطقة الخارجية من قرص الحطام من أكثر من 20% من جليد الماء".

كلما اقترب الباحثون من مركز القرص، قلّ ما وجدوه من جليد الماء. ففي منتصف قرص الحطام تقريبًا، رصد تلسكوب جيمس ويب حوالي 8% من جليد الماء. ومن المرجح أن جزيئات الماء المتجمدة تتشكل هنا بوتيرة أسرع قليلًا من وتيرة تحللها. أما في منطقة قرص الحطام الأقرب إلى النجم، فلم يرصد تلسكوب ويب أي جليد ماء تقريبًا. ومن المرجح أن ضوء النجم فوق البنفسجي يُبخر أقرب جزيئات جليد الماء. ومن المحتمل أيضًا أن تكون الصخور المعروفة بالكواكب الصغيرة قد "حبست" الماء المتجمد في باطنها، وهو ما لا يستطيع تلسكوب ويب رصده.

## انبعاث بخار الماء من جدار التجويف الدافئ للنجم HD 100546

تُقدم هذه الدراسة رصدًا مكانيًا عالي الدقة لخط الماء عند تردد 183 جيجاهرتز في القرص المحيط بنجم[1] Herbig هيربيج HD 100546، باستخدام مصفوفة أتاكاما Atacama الكبيرة Millimeter/submillimeter تم الكشف عنه بواسطة المرصد (ALMA). يبلغ انبعاث بخار الماء ذروته عند الحافة الداخلية لتجويف الغبار الدافئ، الواقع على بُعد 15 وحدة فلكية تقريبًا من النجم المركزي. نعزو ذلك إلى التبخر الحراري عند خط تجمد الماء، والذي ينزاح للخارج عند جدار تجويف الغبار المُسخّن مباشرةً بالإشعاع المكثف. تُعد هذه الدراسة أول صورة مكانية عالية الدقة لخط تجمد الماء باستخدام رصد ALMA لنظير الماء الرئيسي في قرص كوكبي أولي. يتوافق شكل انبعاث الماء، الذي يبلغ ذروته داخل الحلقة الغبارية الأولى، مع رصد ALMA السابق لجزيئات عضوية معقدة تحتوي على الأكسجين في القرص، بما في ذلك الميثانول المُتبخر حراريًا. تشير هذه النتائج إلى أن التجاويف الدافئة للأقراص الانتقالية توفر أهدافًا مثالية لإعادة بناء التوزيع المكاني لبخار الماء وموقع خط الثلج مباشرةً باستخدام مرصد ألما، وربط انبعاث بخار الماء مباشرةً بامتصاص الجليد للأنواع العضوية المعقدة.

يُظهر النجم HD 100546 طيفًا غنيًا بالخطوط الطيفية، حيث رُصدت جزيئات متنوعة باستخدام مرصد ألما، من بينها جزيئات عضوية معقدة، مثل الميثانول وفورمات الميثيل، التي تُظهر انبعاثات حلقية الشكل وتغيرات سمتية azimuthal. وبالتحديد، تبلغ درجة حرارة إثارة الميثانول حوالي 152 كلفن ضمن نطاق 110 وحدة فلكية، وهو ما يتوافق مع أصله الناتج عن التبخر الحراري. لذا، من المتوقع رصد الماء المتبخر حراريًا في نفس منطقة الميثانول، نظرًا لتشابه درجات حرارة تبخرهما. وقد قام م. ليمكر Leemker وآخرون بنمذجة قرص النجم HD 100546 باستخدام برنامج DALI لمحاكاة رصد انبعاثات الخطوط الطيفية بواسطة مرصد ألما ALMA، وتوقعوا أن يكون موقع خط الثلج عند حوالي 15 وحدة فلكية، على الحافة الداخلية لحلقة الغبار الأولى.

[1] Luna Rampinelli, Stefano Facchini, Margot Leemker, Andrea Isella, Pietro Curone, Myriam Benisty, Elizabeth Humphreys, and Leonardo Testi, Water Vapor Emission at the Warm Cavity Wall of the HD 100546 Disk as Revealed by ALMA, The Astrophysical Journal Letters, 996:L17 (10pp), 2026 January 1

وقد رُصد الماء في الحالة الغازية سابقًا في القرص المحيط بالنجم HD 100546 بواسطة مرصد هيرشل Herschel. تم استهداف كل من الخطوط الباردة والدافئة ذات طاقات الحالة العليا التي تتراوح بين 50 و1000 كلفن تقريبًا، ولكن تم رصد خطين باردين فقط عند 557 جيجاهرتز (Eu = 61 K) و1113 GHz (Eu = 53 K)، ونُسبا إلى خزان الماء البارد المُمتص ضوئيًا. واستُنتج أن منطقة الانبعاث تقع خارج نطاق 40 وحدة فلكية من خلال تحليل طيف الخطوط.

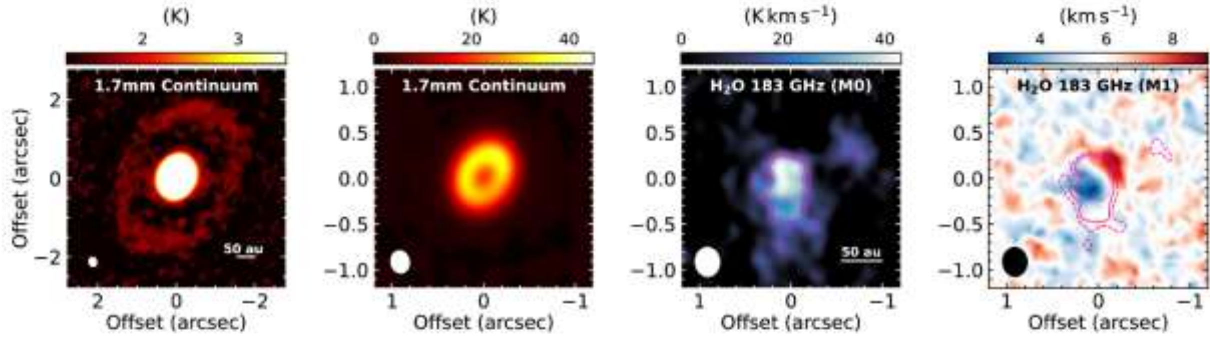
قام ل. م. بيروفانو L. M. Pirovano بنمذجة رصدات مرصد هيرشل للنجم HD 100546 باستخدام برنامج DALI، وحدد وفرة الماء في الخزانات الثلاثة المذكورة في القسم 1. ويتوقع نموذجهم المرجعي وفرة منخفضة للماء في المكون المُمتص حراريًا (<$10^{-9}$) وفي الخزان الساخن المتكون في الحالة الغازية (<$10^{-10}$)، بينما يحتاج المكون المُمتص ضوئيًا في الطبقات المتوسطة خارج حلقة الغبار عند مسافة 40 وحدة فلكية تقريبًا إلى وفرة نسبية (حوالي $3 \times 10^{-9}$) لمحاكاة الرصدات.

وأخيرًا، رصد م. هوندا سمة امتصاص عند 3 ميكرومتر باستخدام مرصد جيميني في قرص النجم HD 100546، مرتبطة بجليد الماء في الطبقة السطحية في الفجوة الخارجية بين 40 و120 وحدة فلكية، وهو ما يتوافق مع النتائج التي قدمها ل. م. بيروفانو وآخرون.

في هذا العمل، نقدم أولى الملاحظات المكانية الدقيقة لنظير بخار الماء الرئيسي باستخدام مرصد ألما في قرص انتقالي. تُظهر ملاحظاتنا لقرص النجم HD 100546 ما يلي:

1. انبعاث الماء بذروته عند جدار التجويف الدافئ للقرص الانتقالي. تدفع درجة الحرارة المرتفعة في تجويف الغبار، الناتجة عن مجال الإشعاع المكثف، خط تجمد الماء إلى أقطار أكبر، مما يسمح للماء بالانفصال الحراري عند الحافة الداخلية لتجويف الغبار؛
2. أول صورة مباشرة لخط تجمد الماء في قرص كوكبي أولي، من خلال ملاحظات مكانية دقيقة لنظير الماء الرئيسي؛
3. توزيع بخار الماء في الحالة الغازية، مكملاً بذلك الملاحظات السابقة للمركبات العضوية الغنية بالأكسجين في القرص الانتقالي. يكشف هذا أن الكواكب المتشكلة داخل التجويف الدافئ للقرص الانتقالي تتعرض لبيئة كيميائية غنية بالماء، والتي يمكن أن تترك بصمة حاسمة على التركيب الجوي للكواكب المتشكلة في القرص.

4. تكمن إمكانات مرصد ألما في تتبع توزيع بخار الماء في الأقراص التي تتشكل فيها الكواكب، وذلك بفضل الظروف الجوية المواتية للغاية التي تم التوصل إليها في موقع المرصد، والدقة والحساسية العالية التي يمكن تحقيقها.




اللوحتان الأولى والثانية: خرائط طيفية متصلة بطول موجي 1.7 مم لقرص النجم HD 100546، تُظهر الحلقة الخارجية الخافتة (الأولى) وتكبيرًا للحلقة الداخلية (الثانية). اللوحة الثالثة: خريطة شدة متكاملة لانبعاث خط $H_2O$ بتردد 183 جيجاهرتز. تُعبّر الشدة عن درجة حرارة السطوع المتكاملة مع السرعة. تُظهر الخطوط الوردية خطوط كفاف σ3 وσ4 وσ5، حيث تُحسب σ كانحراف معياري داخل حلقة بين واللوحة الرابعة: خريطة سرعة مُرجّحة بالشدة لخط الماء بتردد 183 جيجاهرتز. يتركز مقياس الألوان عند السرعة النظامية 5.7 كم/ث (اللون الأبيض). يُمثل الشكل البيضاوي في أسفل يسار كل لوحة الشعاع

## اكتشاف NASA كوكبان خارج المجموعة الشمسية يتكونان في الغالب من الماء

توصل فريق بحثي بقيادة باحثين من جامعة مونتريال إلى أدلة تُشير إلى أن كوكبين[1] خارج المجموعة الشمسية يدوران حول نجم قزم أحمر هما "عوالم مائية"، حيث يُشكل الماء نسبة كبيرة من مكوناتهما. يقع هذان الكوكبان في نظام كوكبي يبعد 218 سنة ضوئية في كوكبة القيثارة، وهما يختلفان تمامًا عن أي كوكب معروف في نظامنا الشمسي. نشر الفريق، بقيادة كارولين بيوليه Caroline Piaulet من معهد تروتييه Trottier لأبحاث الكواكب الخارجية بجامعة مونتريال، دراسة مُفصلة عن هذا النظام الكوكبي، المعروف باسم Kepler-138 كيبلر-138، في مجلة "نيتشر أسترونومي Nature Astronomy" اليوم.

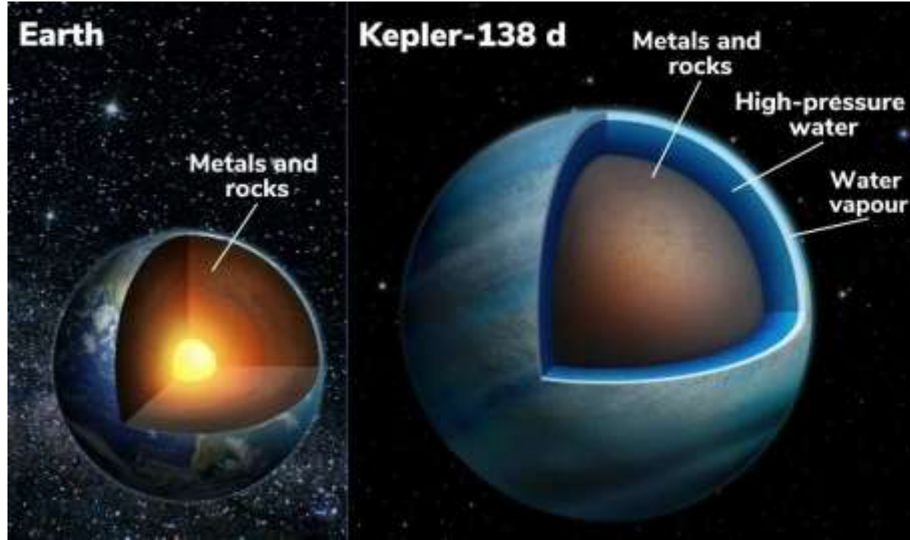
لم يتم رصد الماء بشكل مباشر في كوكبي كيبلر-138 ج ود، ولكن من خلال مقارنة أحجام الكواكب وكتلها بالنماذج، استنتج علماء الفلك أن جزءاً كبيراً من حجمها - يصل إلى نصفه - يتكون من مواد أخف من الصخور وأثقل من الهيدروجين أو الهيليوم (اللذين يشكلان الجزء الأكبر من الكواكب الغازية العملاقة مثل المشتري). ويُعد الماء أكثر هذه المواد المحتملة شيوعاً.

وأوضح بيورن بينيك Björn Benneke، المؤلف المشارك في الدراسة وأستاذ الفيزياء الفلكية في جامعة مونتريال: "كنا نعتقد سابقاً أن الكواكب الأكبر قليلاً من الأرض عبارة عن كرات ضخمة من المعدن والصخور، أشبه بنسخ مكبرة من الأرض، ولهذا السبب أطلقنا عليها اسم "الأرض العملاقة". مع ذلك، فقد أظهرنا الآن أن هذين الكوكبين، Kepler-138 c & d كيبلر-138 ج ود، يختلفان اختلافًا كبيرًا في طبيعتهما، وأن جزءًا كبيرًا من حجمهما الكلي يتكون على الأرجح من الماء. وهذا أفضل دليل حتى الآن على وجود عوالم مائية، وهو نوع من الكواكب افترض علماء الفلك وجوده منذ زمن طويل

يبلغ حجم الكوكبين ج ود أكثر من ثلاثة أضعاف حجم الأرض، وكتلتهما ضعف كتلة الأرض، لكن كثافتهما أقل بكثير من كثافة الأرض. وهذا أمرٌ مثير للدهشة، لأن معظم الكواكب الأكبر حجمًا بقليل من الأرض، والتي دُرست بالتفصيل حتى الآن، بدت جميعها عوالم صخرية مثل كوكبنا. ويقول الباحثون إن أقرب مثال للمقارنة

[1] ( https://science.nasa.gov/universe/exoplanets/two-exoplanets-may-be-mostly-water-nasas-hubble-and-spitzer-find/

هو بعض الأقمار الجليدية في النظام الشمسي الخارجي، والتي تتكون أيضًا في معظمها من الماء المحيط بنواة صخرية.




هذه الكواكب قد لا تحتوي على محيطات مماثلة لتلك الموجودة على الأرض مباشرةً على سطحها. يقول بيوليه: "من المرجح أن تكون درجة حرارة الغلاف الجوي لكوكب كيبلر-138 د أعلى من درجة غليان الماء، ونتوقع وجود غلاف جوي كثيف من البخار. فقط تحت هذا الغلاف البخاري قد يوجد ماء سائل تحت ضغط عالٍ، أو حتى ماء في حالة أخرى تحدث عند ضغوط عالية، تُسمى المائع فوق الحرج".

لا يقع الكوكبان المحتملان اللذان يحتمل وجود الماء فيهما، كيبلر-138 ج وكيبلر-138 د، في المنطقة الصالحة للسكن، وهي المنطقة المحيطة بالنجم حيث تسمح درجات الحرارة بوجود الماء السائل على سطح كوكب صخري. ولكن في بيانات هابل وسبيتزر، وجد الباحثون أدلة إضافية على وجود كوكب جديد في النظام، كيبلر-138 هـ، في المنطقة الصالحة للسكن.

## محتوى الماء في الكواكب الخارجية الصخرية في المنطقة الصالحة للسكن

استكشفت هذه الدراسة[1] باطن الكواكب الصخرية الخارجية لتحديد تلك التي قد تحتوي على كميات كبيرة من الماء. قمنا بنمذجة باطن 28 كوكبًا صخريًا خارجيًا، بافتراض أربع طبقات مختلفة: نواة حديدية، ووشاح صخري، وطبقة جليدية عالية الضغط، وطبقة سطحية من الجليد/الماء. نظرًا للتحيز الرصدي، تقتصر دراسة على الكواكب الخارجية الواقعة في المنطقة الصالحة للسكن. حدد نطاقًا من نسب كتلة الماء المحتملة لكل كوكب بما يتوافق مع البنية الكوكبية المُنمذجة. حسب التسخين المدّي الذي تتعرض له هذه الكواكب الخارجية من خلال التفاعلات الجاذبية مع نجومها المضيفة، بافتراض خواص انسيابية مرنة لزجة ماكسويلية Maxwell viscoelastic rheology تعتمد على درجة الحرارة والتركيب. بافتراض وفرة العناصر المشعة المرصودة في نيازك النظام الشمسي، حسب أيضًا تدفق الحرارة الإشعاعية داخل الكواكب. قدر احتمالية وجود طبقة محيطية سميكة في هذه الكواكب، مع الأخذ في الاعتبار تأثير كل من التسخين المدّي والإشعاعي. أظهرت النتائج أن الكواكب الخارجية Proxima Centauri b وRoss 128 b وTeegarden's b وGJ 1061 c وTRAPPIST-1 e قد تمتلك مخزونًا كبيرًا من الماء السائل. علاوة على ذلك، يشير المحتوى العالي للغاية من الماء ($H_2O$) في الكواكب الخارجية Kepler-62 f وKepler-1652 b وKepler-452 b وKepler-442 b إلى أن هذه الكواكب قد تحتفظ بغلاف جوي من بخار الماء، وقد تكون في الواقع أمثلة على عوالم محيطية أكبر. عند اكتشاف كواكب خارجية صخرية جديدة خارج النطاق الصالح للسكن.

بحسب مختبر قابلية الكواكب للسكن (PHL)، يوجد حتى الآن 59 كوكبًا صخريًا خارج المجموعة الشمسية تدور في المناطق الصالحة للسكن حول نجومها. وتتعدد مناهج دراسة قابلية الكواكب الخارجية للسكن. ونظرًا لاعتماد قابلية سطح الكوكب للسكن اعتمادًا كبيرًا على وجود غلاف جوي، يُعدّ رصد وقياس تركيب أغلفة الكواكب الخارجية - وهو ما يندرج ضمن نطاق تلسكوب جيمس ويب الفضائي الذي أُطلق مؤخرًا من أهم الأدوات لدراسة قابلية الكواكب الخارجية للسكن اليوم. مع ذلك، في غياب الغلاف الجوي، من غير المرجح أن تتطور الحياة على سطح الكوكب. ويمكن أن تؤدي عمليات فقدان الغلاف الجوي إلى كواكب خالية تمامًا من غلافها الجوي. وقد تكون هذه العمليات ذات أهمية خاصة للكواكب الخارجية التي تدور بالقرب من النجوم

---

[1] Ádám Boldog1,2,3, Vera Dobos4,3, László L. Kiss1,2,5, Marijn van der Perk4 and Amy C. Barr, Water content of rocky exoplanets in the habitable zone, Astronomy & Astrophysics A&A, Volume 681, January 2024, A109

القزمة الحمراء. مع ذلك، قد توفر الكواكب التي تفتقر إلى طبقة جوية كبيرة الظروف اللازمة لنشوء الحياة. قد تكون هذه الكواكب صالحة للسكن في حال وجود محيط تحت سطحها، كما هو الحال في إنسيلادوس. لذا، من المهم استكشاف طرق أخرى لدراسة صلاحية الكواكب الخارجية للسكن دون الاعتماد على وجود غلاف جوي.

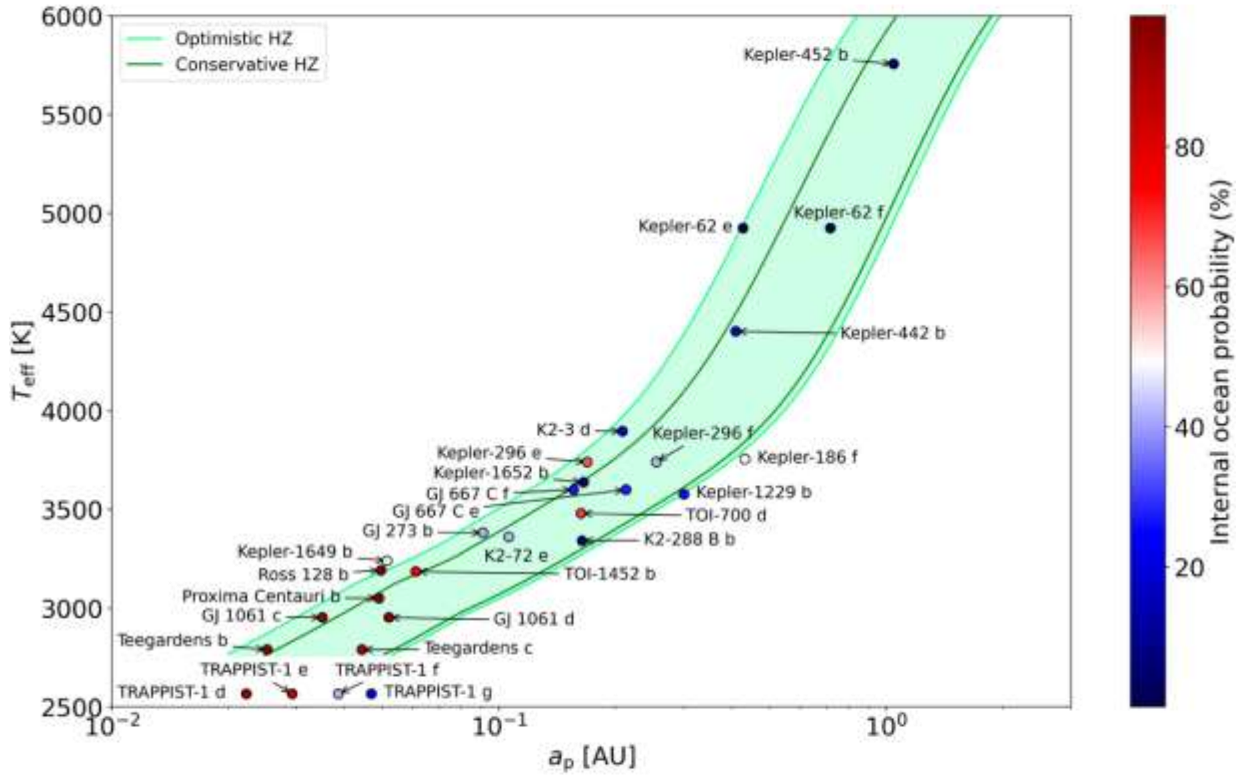
لم يُولَ اهتمامٌ يُذكر لاحتمالية ازدهار الحياة في محيطات المياه السائلة تحت سطح الكواكب الخارجية. ففي وجود الماء تحت طبقة من الجليد السطحي، قد يُصبح باطن الكوكب بيئةً مثاليةً لنمو الحياة، إذ يُمكن أن تُوفر طبقة الجليد السطحية حمايةً من الجسيمات عالية الطاقة. وبما أن الماء يُمكن أن يتواجد تحت السطح حتى في غياب الغلاف الجوي، فإن دراسة البنية الداخلية للكواكب الخارجية قد تفتح آفاقًا جديدةً لدراسات قابلية السكن، لا تعتمد على اعتبارات الغلاف الجوي. تدور معظم الكواكب الصخرية الخارجية المعروفة حاليًا بالقرب من نجومها، مما يُرجح أنه يمنعها من الاحتفاظ بالماء. تُعد الكواكب الخارجية في المنطقة الصالحة للسكن أهدافًا مثاليةً، إذ يُمكن دراسة قابلية السكن على سطحها وتحت سطحها. فعلى سبيل المثال، قد يُشير المحتوى العالي من الماء ($H_2O$) إلى وجود خزانات مياه تحت السطح، أو، في حال وجود غلاف جوي شبيه بغلاف الأرض، إلى وجود محيطات سطحية عالمية. من المهم التأكيد على أن دراسة إمكانية وجود خزانات مياه جوفية لا تنفي وجود أغلفة جوية أو محيطات سائلة على سطح الكواكب، بل توسع نطاق المناطق الصالحة للسكن لتشمل الطبقات الجوفية. علاوة على ذلك، قد تُسهم دراسة البنية الداخلية للكواكب الخارجية في تحسين فهمنا للعلاقة بين تكوين الكواكب وتركيبها، فضلاً عن المساعدة في تحسين نماذج تطور الكواكب.

تم تقدير محتوى الماء ($H_2O$) لجميع الكواكب الثمانية والعشرين بناءً على نماذجها الداخلية. بالنسبة لبنية داخلية معينة، يُعرَّف الكسر الكتلي للماء بأنه مجموع الكسور الكتلية لطبقة الجليد/الماء السطحية وطبقة الضغط العالي والضغط المنخفض (HPP) الموجودة أسفلها. ونظرًا لوجود عدد كبير من البنى الداخلية المختلفة الممكنة لكل كوكب، فقد أسفرت حساباتنا عن نطاق واسع من الكسور الكتلية للماء لكل كوكب.

تُظهر النتائج أن جميع هذه الكواكب قد تمتلك نسبًا عالية من الماء ($H_2O$) تكفي لتكوين أسطح جليدية/مائية عالمية. الكواكب ذات درجات حرارة سطحية أعلى من درجة انصهار الجليد ونسب عالية من الماء (مثل Kepler-296 e) قد تحتوي على محيطات عالمية بغض النظر عن وجود غلاف جوي. بالنسبة للكواكب التي تنخفض فيها درجة حرارة السطح عن درجة انصهار الجليد، قد لا يوجد ماء سائل على السطح في غياب الغلاف الجوي،

وقد تشير النسب العالية من الماء إلى وجود طبقات جليدية عالمية. فإن القيم العالية لنسبة الماء ($H_2O$) قد تُشير أيضًا إلى وجود محيطات عالمية على سطحها إذا كانت أغلفتها الجوية مشابهة لغلاف الأرض الجوي.

لتقييم إمكانية وجود خزان مائي تحت سطح هذه الكواكب تقييمًا دقيقًا، من المهم مراعاة عوامل أخرى، مثل احتمالية امتلاك الكوكب تركيبة صخرية. تُمثل قيم احتمالية كون الكوكب صخريًا، أي احتمالية امتلاكه تركيبة صخرية، بنسبة الكتل الكوكبية المتولدة التي تقل عن 2.04 كتلة شمسية لكل كوكب. تستند هذه الكتلة الحدية إلى نقطة التحول بين الكواكب الصخرية والكواكب الشبيهة بنبتون في نموذج التنبؤ. من جهة أخرى، يرى لوك وباليه Luque & Pallé في دراسة حديثة أن كثافة الكوكب الخارجي هي العامل الرئيسي الذي يميز الكواكب الصخرية، والعوالم المائية، والكواكب الشبيهة بنبتون المصغرة عن بعضها، بالنسبة للكواكب التي تدور حول النجوم القزمة الحمراء، وليس كتلة الكوكب أو نصف قطره. مع ذلك، ولضمان الاتساق، استُخدمت الكتلة الحدية المستندة إلى نقطة التحول في برنامج التنبؤ في هذه الدراسة لتصنيف جميع الحالات. الاستثناء الوحيد كان الكوكب TOI-1452 b، حيث كانت كتلة الكوكب ونصف قطره معروفين مع هامش خطأ متناظر. في هذه الحالة، على الرغم من أن كتلة الكوكب تجاوزت نقطة التحول 2.04 M⊕، إلا أن الكثافة أشارت إلى تركيبة أرضية في جميع الحالات. ولأنه لم يكن من الضروري تقريب الكتلة أو نصف القطر باستخدام برنامج Forecaster، لم ينتج عن ذلك أي تناقض. من المهم ملاحظة أنه في حين أن بعض الكواكب، مثل Kepler-442 b، قد تمتلك طبقة $H_2O$ ممتدة من المحتمل أن تنصهر بسبب عمليات التسخين الداخلية، إلا أن احتمالية كون الكوكب نفسه صخريًا منخفضة. من الواضح أن أفضل الأهداف لدراسات قابلية السكن هي تلك الكواكب الخارجية التي يُرجح بشدة أن تكون ذات تركيبة صخرية، ولديها فرصة كبيرة لامتلاك طبقة $H_2O$، وتتعرض لتدفق حراري داخلي معتدل.



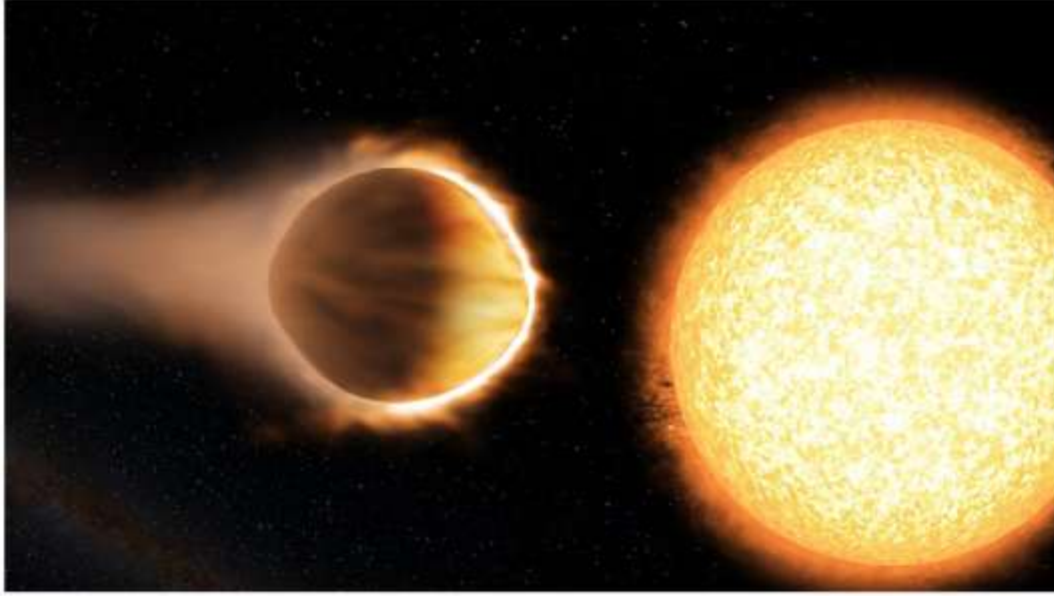

فى الشكلل اعلاه يوضح احتمالات وجود محيطات داخلية على الكواكب الخارجية المدروسة. يوضح شريط الألوان احتمال وجود خزان ماء سائل في باطن كل كوكب. تشير الألوان الحمراء إلى احتمال كبير، بينما الكواكب ذات الدوائر الزرقاء الداكنة أقل احتمالاً لوجود محيطات داخلية. تم حساب المنطقة الصالحة للسكن، المعروضة كشريط أخضر لأغراض التوضيح فقط، بناءً على معايير نجمية من نماذج التطور النجمي النظرية.

## علماء الكواكب يكتشفون أنه قد يكون هناك العديد من الكواكب ذات الغلاف الجوي الغني بالماء

كشفت دراسة أجرتها جامعة شيكاغو[1] عن آلية لتكوّن الغلاف الجوي للكواكب الصخرية الحارة في أنظمة نجمية أخرى واحتفاظها به. فالغلاف الجوي هو أساس الحياة على سطح الأرض، إذ ينظم مناخنا ويحمينا من الأشعة الكونية الضارة. ورغم أن التلسكوبات رصدت أعدادًا متزايدة من الكواكب الصخرية، فقد اعتقد العلماء أن معظم أغلفة هذه الكواكب قد فُقدت منذ زمن بعيد. إلا أن دراسة جديدة أجراها باحثون من جامعة شيكاغو وجامعة ستانفورد تقترح آليةً تمكّن هذه الكواكب من تكوين أغلفة جوية غنية ببخار الماء، والاحتفاظ بها لفترات طويلة. نُشرت الدراسة في 15 مارس 2021 في مجلة Astrophysical Journal Letters، وهي توسّع فهمنا لتكوين الكواكب، وقد تُسهم في توجيه البحث عن عوالم صالحة للسكن في أنظمة نجمية أخرى.

قال إدوين كايت Edwin Kite الخبير في تطور الأغلفة الجوية للكواكب عبر الزمن: "يشير نموذجنا إلى أن هذه الكواكب الخارجية الصخرية الحارة يجب أن تمتلك غلافًا جويًا غنيًا بالماء في مرحلة ما، وقد يستغرق ذلك وقتًا طويلًا بالنسبة لبعض الكواكب". ومع توثيق التلسكوبات لالمزيد من الكواكب الخارجية، يحاول العلماء معرفة شكلها. عمومًا، يمكن للتلسكوبات أن تخبرنا عن الحجم الفيزيائي للكوكب الخارجي، وقربه من نجمه، وإذا حالفنا الحظ، عن كتلته. وللتعمق أكثر، يتعين على العلماء الاستقراء بناءً على ما نعرفه عن الأرض والكواكب الأخرى في نظامنا الشمسي. لكن يبدو أن أكثر الكواكب وفرةً لا تشبه تلك التي نراها حولنا. وأضاف كايت: "ما كنا نعرفه مسبقًا من مهمة كيبلر Kepler هو أن الكواكب الأصغر قليلًا من نبتون وفيرة جدًا، وهو ما كان مفاجئًا لأنه لا يوجد أي منها في نظامنا الشمسي". "لا نعرف على وجه اليقين مما تتكون، ولكن هناك أدلة قوية على أنها كرات من الصهارة مغلفة بغلاف جوي من الهيدروجين."

[1] ( https://scitechdaily.com/planetary-scientists-discover-there-may-be-many-planets-with-water-rich-atmospheres/



تشير دراسة إلى أن الكواكب الخارجية القريبة من نجومها قد تحتفظ بغلاف جوي كثيف غني بالماء. في الأعلى، رسم توضيحي للكوكب الخارجي WASP-121b الذي يبدو أن غلافه الجوي يحتوي على الماء

Credit: Engine House VFX, At-Bristol Science Centre, University of Exeter

يوجد أيضًا عدد لا بأس به من الكواكب الصخرية الصغيرة المشابهة، ولكن بدون غلاف الهيدروجين. لذا، افترض العلماء أن العديد من الكواكب ربما تبدأ حياتها مثل تلك الكواكب الأكبر حجمًا ذات الأغلفة الجوية المكونة من الهيدروجين، ولكنها تفقد غلافها الجوي عندما يشتعل النجم القريب ويقذف الهيدروجين بعيدًا. لكن لا تزال هناك تفاصيل كثيرة بحاجة إلى توضيح في هذه النماذج. بدأ كايت وزميلته لورا شيفر من جامعة ستانفورد باستكشاف بعض العواقب المحتملة لوجود كوكب مغطى بمحيطات من الصخور المنصهرة.

قال كايت: "الصهارة السائلة سائلة جدًا في الواقع"، لذا فهي تتقلب بقوة، تمامًا مثل محيطات الأرض. هناك احتمال كبير أن تمتص محيطات الصهارة هذه الهيدروجين من الغلاف الجوي وتتفاعل لتكوين الماء. يتسرب بعض هذا الماء إلى الغلاف الجوي، لكن الجزء الأكبر منه يُمتص في الصهارة. بعد أن يُجرّد النجم القريب الغلاف الجوي الهيدروجيني، يُسحب الماء إلى الغلاف الجوي على شكل بخار. وفي النهاية، يتبقى للكوكب غلاف جوي غني بالماء.

## يوجد معظم الماء على الكواكب الخارجية في أعماقها وليس على سطحها

تُحدث النتائج الجديدة المتعلقة بتوزيع الماء في الكواكب[1] تغييرات جذرية في تفسير بيانات الرصد الفلكي. فباستخدام تلسكوباتهم في الفضاء وعلى الأرض، يستطيع علماء الفلك، في ظل ظروف معينة، قياس وزن وحجم الكواكب الخارجية. ويستخدمون هذه الحسابات لرسم مخططات الكتلة-نصف القطر التي تسمح باستخلاص استنتاجات حول تركيب الكوكب. وإذا تم تجاهل ذوبان الماء وتوزيعه عند القيام بذلك - كما كان الحال حتى الآن - فقد يُقلل حجم الماء بشكل كبير، بما يصل إلى عشرة أضعاف. يقول دورن: "الكواكب أغنى بالماء مما كان يُفترض سابقًا".

يُعدّ توزيع الماء بالغ الأهمية لفهم كيفية تكوّن الكواكب وتطورها. فالماء الذي يغوص إلى لبّ الكوكب يبقى محصورًا هناك إلى الأبد. أما الماء المذاب في محيط الصهارة في الوشاح، فيمكنه أن ينطلق غازيًا ويصعد إلى السطح أثناء تبريد الوشاح. ويوضح دورن: "لذا، إذا وجدنا ماءً في غلاف كوكب ما، فمن المحتمل وجود كميات أكبر بكثير في باطنه".

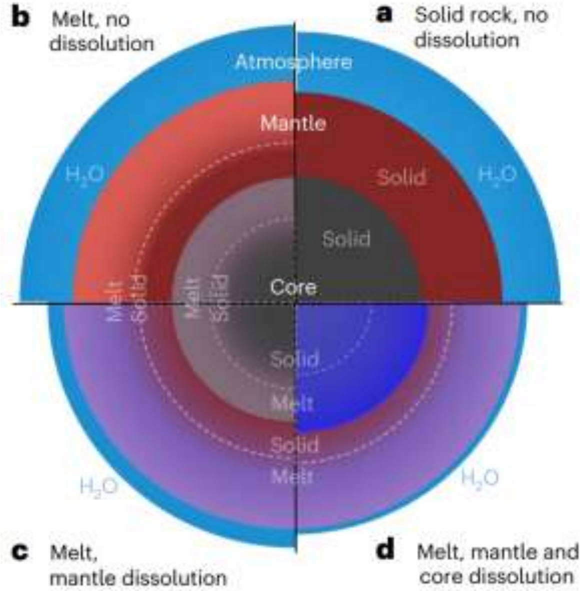
هذا ما يسعى إليه تلسكوب جيمس ويب الفضائي، الذي يرسل البيانات من الفضاء إلى الأرض منذ عامين. فهو قادر على تتبع الجزيئات في غلاف الكواكب الخارجية. ويشرح العالم: "لا يمكن قياس سوى تركيب الغلاف الجوي العلوي للكواكب الخارجية بشكل مباشر. ويرغب فريقنا في الربط بين الغلاف الجوي وأعماق الأجرام السماوية الداخلية".

وتُعدّ البيانات الجديدة للكوكب الخارجي المسمى TOI-270d مثيرة للاهتمام بشكل خاص. تقول دورن، التي شاركت في النشرة المتعلقة بكوكب TOI-270d: "لقد جُمعت هناك أدلة على وجود تفاعلات فعلية بين محيط الصهارة في باطنه وغلافه الجوي". وتشمل قائمة الأجرام المثيرة للاهتمام التي ترغب في دراستها عن كثب كوكب K2-18b، الذي تصدّر عناوين الأخبار لاحتمالية وجود حياة عليه.

توصلت الدراسة الجديدة إلى استنتاج مختلف: من المرجح أن تكون الكواكب ذات الطبقات المائية العميقة نادرة الحدوث، إذ أن معظم المياه على الكواكب العملاقة الشبيهة بالأرض لا تقع على السطح، كما كان يُعتقد

[1] Luo H, Dorn C, Deng J. The interior as the dominant water reservoir in super-Earths and sub-Neptunes. Nature Astronomy, 20 August 2024, Nature Astronomy, Volume 8, p. 1399-1407

سابقًا، بل محصورة داخل النواة. يدفع هذا العلماء إلى افتراض أن الكواكب ذات المحتوى المائي العالي نسبيًا قد تمتلك القدرة على تهيئة ظروف معيشية شبيهة بالأرض. وبذلك، كما خلصت دورن وزملاؤها، تُلقي دراستهم ضوءًا جديدًا على إمكانية وجود عوالم غنية بالمياه قادرة على دعم الحياة.




استُخدمت أربعة سيناريوهات نموذجية في الدراسة. يُشبه النموذج (أ) إلى حد كبير النماذج المعروضة، وتتبعه نماذج أخرى شائعة الاستخدام لبنية الكواكب الخارجية الداخلية، مع إهمال مصهورات السيليكات. النموذج (ب) هو النموذج الذي يتضمن انصهارًا في كل من الوشاح واللب، ولكن دون ذوبان الماء. يُمثل النموذج (ج) النموذج الذي يتضمن ذوبان الماء في مصهورات الوشاح. يتوافق النموذج (د)، الذي يتضمن ذوبان الماء في كل من مصهورات الوشاح واللب، بشكل كبير مع فهمنا الحالي لفيزياء المعادن وبنية الكواكب الخارجية الداخلية، وبالتالي فهو التمثيل الأكثر دقة استنادًا إلى معرفتنا الحالية. تُصوَّر مادة اللب باللون الرمادي الداكن (صلبة وجافة)، أو الرمادي الفاتح (منصهرة وجافة)، أو الأزرق البنفسجي (مائية وصلبة أو جافة). تُصوَّر مادة الوشاح باللون الأحمر الداكن (صلبة وجافة)، أو الأحمر الفاتح (منصهرة وجافة)، أو البنفسجي الفاتح (منصهرة ومائية). تُصوَّر طبقات البخار باللون الأزرق. تفصل الخطوط المتقطعة بين الأطوار المنصهرة والصلبة.

## كيف تشكلت كواكبنا

الكواكب الأرضية مقابل العمالقة الغازية والجليدية: نظرية جديدة تفسر سبب اختلاف النظام الشمسي الداخلي عن المناطق الخارجية[1]، وتتعارض مع الاعتقاد السائد. وقد اقترح هذه النظرية فريق بحث دولي بمشاركة المعهد الفدرالي السويسري للتكنولوجيا في زيورخ (ETH Zurich).

عطارد والزهرة والأرض والمريخ في النظام الشمسي الداخلي كواكب صغيرة وجافة نسبيًا، على عكس المشتري وزحل وأورانوس ونبتون في المناطق الخارجية، وهي كواكب تحتوي على كميات أكبر بكثير من العناصر المتطايرة. تقول ماريا شونباخلر Maria Schönbächler، الأستاذة في معهد الجيوكيمياء وعلم الصخور في المعهد الفدرالي السويسري للتكنولوجيا في زيورخ: "في السنوات القليلة الماضية، اكتشفنا أيضًا فرقًا رئيسيًا آخر بين جزئي النظام الشمسي"، وتضيف: "للنيازك بصمة مختلفة اعتمادًا على ما إذا كانت قد نشأت في النظام الشمسي الداخلي أو الخارجي". ويحدد مصدرها محتواها من النظائر. النظائر هي ذرات متميزة لعنصر معين، تشترك جميعها في نفس عدد البروتونات في نواتها، لكنها تختلف في عدد النيوترونات. التفسير الحالي للاختلافات في التركيب الكيميائي للكواكب والنيازك هو كالتالي: قبل 4.5 مليار سنة، عندما كان النظام الشمسي يتشكل من قرص من الغاز والغبار، كان كوكب المشتري أول كوكب يتشكل. وقد قسم القرص إلى منطقتين، داخلية وخارجية، ومنع تبادل المواد بينهما.

توضح شونباخلر: "بصفتنا مجموعة من الباحثين، نتعاون عبر مجموعة واسعة من التخصصات، طورنا نموذجًا جديدًا لتكوين الكواكب. يقدم هذا النموذج تفسيرًا بديلًا للاختلافات في النظائر، ولا يلعب كوكب المشتري أي دور فيه". وقد انبثقت فكرة هذه النظرية الجديدة من خلال تعاون بين باحثين من المعهد الفدرالي السويسري للتكنولوجيا في زيورخ (ETH) وجامعة زيورخ في المركز الوطني للكفاءة في البحث (NCCR) PlanetS، الذي ينتمي إليه شونباخلر. ينشر الفريق الدولي الآن نتائج بحثه في مجلة ساينس.

يقول تيم ليشتنبرغ Tim Lichtenberg من جامعة أكسفورد، المؤلف الرئيسي للدراسة والعضو السابق في المركز الوطني للكفاءة البحثية في علوم الكواكب (NCCR PlanetS)، والحاصل على درجة الدكتوراه من المعهد الفدرالي

[1] Lichtenberg, T. ; Drążkowska, J. ; Schönbächler, M. ; Golabek, G. J. ; Hands, T. O., Bifurcation of Planetary Building Blocks During Solar System Formation, Science, Volume 371, Issue 6527, 22 Jan 2021, P. 365-370, American Association for the Advancement of Science

السويسري للتكنولوجيا في زيورخ (ETH): "استخدمنا محاكاة حاسوبية لحساب ما كان يمكن أن يحدث في النظام الشمسي المبكر". ووفقًا لهذه المحاكاة، تشكل النظام الشمسي الداخلي والخارجي على مرحلتين منفصلتين في وقتين مختلفين. في المراحل المبكرة جدًا، عندما كان القرص الأصلي من الغبار والغاز، بالإضافة إلى الشمس، لا يزالان في طور التكوين، ظهرت اللبنات الأساسية الأولى للكواكب الداخلية - ويشير الخبراء إلى هذه القطع، التي يبلغ قطرها حوالي 100 كيلومتر، باسم الكويكبات. ويلعب خط التجمد دورًا رئيسيًا في هذه العملية، حيث تشكل على مسافة معينة من الشمس التي كانت لا تزال فتية جدًا. داخل خط التجمد، كان الماء موجودًا على شكل بخار، بينما تحول الماء خارجه إلى بلورات جليدية. وخارج خط التجمد مباشرة، تكثف بعض بخار الماء على حبيبات الغبار، التي تجمعت معًا لتشكل الكويكبات الأولى.

يوضح ليشتنبرغ قائلاً: "كانت هذه الكويكبات غنية للغاية بالماء"، مضيفاً: "هذا أمرٌ مُثير للدهشة، لأنه يعني أن الأرض كان ينبغي أن تحتوي على كمية أكبر بكثير من الماء، وبالتالي كان من المفترض أن تبدو اليوم أشبه بالمذنبات". وهنا أيضاً، تُقدم النظرية الجديدة تفسيراً: احتوى قرص الغبار على نظير الألومنيوم-26 المشع، الذي ورثته لبنات بناء الكواكب. يبلغ عمر النصف لهذا النظير 700 ألف عام، ويُطلق كمية هائلة من الطاقة أثناء تحلله - تكفي لتسخين الكويكبات من الداخل وإذابتها. وقد أدى ذلك إلى تكوين نوى حديدية وتبخر الماء وعناصر متطايرة أخرى.

يوضح ليشتنبرغ قائلاً: "في نموذجنا، بعد تكوّن الكويكبات الأولى في النظام الشمسي الداخلي، لم يحدث شيء يُذكر لمدة نصف مليون عام تقريباً". ثم جاءت موجة ثانية من تكوّن الكويكبات، ولكن هذه المرة في النظام الشمسي الخارجي. مع ارتفاع درجة حرارة قرص الغاز والغبار، تحرك خط الثلج نحو الخارج، وتوقفت جزيئات الغبار المتجهة نحو الشمس عند حدود الثلج الجديدة. يصف الباحثون هذه الظاهرة بأنها "ازدحام مروري"، وقد أدت إلى نشوء كويكبات جديدة. يقول ليشتنبرغ: "بدأ تشكل الكواكب في النظام الشمسي الخارجي لاحقًا، ولكنه انتهى بسرعة أكبر؛ بينما احتاجت الكواكب الداخلية وقتًا أطول بكثير". ولأن العملية الثانية بدأت لاحقًا، فقد تحلل جزء كبير من الألومنيوم-26 المشع، مما يعني تبخر كمية أقل من العناصر المتطايرة. ونتيجة لذلك، شهدت المنطقة الخارجية تشكل عمالقة غازية وجليدية مثل المشتري وزحل وأورانوس.

يقول شونباخلر: "يُلقي نموذجنا أيضًا ضوءًا جديدًا على نمو الكويكبات الأولية في النظام الشمسي الداخلي، والذي استمر حتى تشكّلت الكواكب الأرضية مثل كوكبنا الأرض". ووفقًا للنموذج، هيمنت التصادمات بين

الكويكبات على المرحلة الأولى. لاحقًا، تسببت جاذبية هذه الأجسام في جذبها وتراكم جزيئات الغبار في عملية يُطلق عليها الخبراء اسم "تراكم الحصى". تلت ذلك مرحلة أخرى من التصادمات حتى نهاية عملية تكوين الأرض، عندما اصطدمت بكتلة كبيرة أخيرة. تسبب هذا الاصطدام في قذف الكوكب الفتيّ لمواد شكّلت في النهاية القمر. كما تُوضح عمليات المحاكاة كيف هاجرت الكواكب مقتربةً من الشمس أثناء تكوّنها، قبل أن تستقر في مداراتها التي نراها اليوم. ويقول ليشتنبرغ: "في دراستنا، نقترح سيناريو شاملًا يُعيد إنتاج تكوين النظام الشمسي وتاريخ تكوينه". وبالفعل، تتوافق حسابات الحاسوب مع بيانات تحليل النيازك والملاحظات الفلكية. يقول شونباخلر: "إن هذا المزيج من بيانات النيازك الحالية ونماذج التطور جديد، وأنا سعيد للغاية بمدى توافق كل شيء".

## السديم الشمسي

يُقدّم تركيب الكواكب دليلاً آخر على أصولها. يسمح لنا التحليل الطيفي بتحديد العناصر الموجودة في الشمس والكواكب[1]. تتشابه الشمس في تركيبها مع كوكبَي المشتري وزحل، حيث يهيمن الهيدروجين على تركيبهما، ما يُشير إلى أنها تشكّلت من نفس المصدر. في المقابل، تفتقر الكواكب الأرضية وقمرنا نسبيًا إلى الغازات الخفيفة والجليد المتنوع الذي يتكوّن من العناصر الشائعة كالأكسجين والكربون والنيتروجين. بدلاً من ذلك، نرى على الأرض وجيرانها في الغالب العناصر الثقيلة النادرة كالحديد والسيليكون. يُشير هذا النمط إلى أن العمليات التي أدّت إلى تكوّن الكواكب في النظام الشمسي الداخلي قد استبعدت بطريقة ما الكثير من المواد الأخفّ شيوعًا في أماكن أخرى. لا بدّ أن هذه المواد الأخفّ قد تسرّبت، تاركةً وراءها بقايا من المواد الثقيلة.

ليس من الصعب تخمين سبب ذلك، مع الأخذ في الاعتبار حرارة الشمس. تتكوّن الكواكب الداخلية ومعظم الكويكبات من الصخور والمعادن، القادرة على تحمّل الحرارة، لكنها تحتوي على كميات ضئيلة جدًا من الجليد أو الغاز، اللذين يتبخّران عند ارتفاع درجات الحرارة. (لرؤية ما نعنيه، قارن فقط المدة التي يبقى فيها الصخر ومكعب الثلج على قيد الحياة عند وضعهما في ضوء الشمس.) في النظام الشمسي الخارجي، حيث كان الجو دائمًا أكثر برودة، تتكون الكواكب وأقمارها، بالإضافة إلى الكواكب القزمة الجليدية والمذنبات، في الغالب من الجليد والغاز.

ثمة نهج ثانٍ لفهم أصول النظام الشمسي، وهو البحث عن أدلة تشير إلى تكوّن أنظمة كواكب أخرى في أماكن مختلفة. لا يمكننا العودة بالزمن إلى الوراء لمشاهدة تكوّن نظامنا الشمسي، لكن العديد من النجوم في الفضاء أصغر بكثير من الشمس. في هذه الأنظمة، قد تظل عمليات تكوّن الكواكب قابلة للملاحظة المباشرة. نلاحظ وجود العديد من "السدم الشمسية" أو الأقراص المحيطة بالنجوم - وهي سحب مسطحة دوارة من الغاز والغبار تحيط بالنجوم الفتية. تشبه هذه الأقراص المراحل الأولى لتكوّن نظامنا الشمسي قبل مليارات السنين.

---

[1] Douglas College Astronomy 1105 (Winter 2018) Copyright 2017 by OpenStax is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



تُظهر هذه الصور الملتقطة بواسطة تلسكوب هابل الفضائي أجزاءً من سديم الجبار، وهي منطقة قريبة نسبيًا حيث تتشكل النجوم حاليًا. تُظهر كل صورة قرصًا نجميًا يدور حول نجم فتيّ. عند النظر إليها من زوايا مختلفة، تبدو بعض هذه الأقراص متوهجة بفعل ضوء نجم قريب، بينما تبدو أخرى داكنة وتظهر كظلال على خلفية الغاز المتوهج لسديم الجبار. كل صورة منها تُعدّ نظيرًا معاصرًا لسديمنا الشمسي، وهو موقع يُحتمل أن تتشكل فيه الكواكب اليوم. حقوق الصورة: تعديل لعمل من وكالة ناسا/وكالة الفضاء الأوروبية، ل. ريتشي (المرصد الأوروبي الجنوبي) (modification of work by NASA/ESA, L. Ricci (ESO)

تُعدّ الأقراص المحيطة بالنجوم ظاهرة شائعة حول النجوم الفتية، مما يُشير إلى أن الأقراص والنجوم تتشكل معًا. يستطيع علماء الفلك استخدام الحسابات النظرية لدراسة كيفية تكوّن الأجسام الصلبة من الغاز والغبار الموجودين في هذه الأقراص أثناء تبريدها. تُظهر هذه النماذج أن المادة تبدأ بالتكتل أولًا بتكوين أجسام أصغر، وهي نواة الكواكب، والتي نُطلق عليها اسم الكويكبات.

تستطيع الحواسيب فائقة السرعة اليوم محاكاة كيفية تجمع ملايين الكويكبات، التي لا يتجاوز قطرها على الأرجح 100 كيلومتر، تحت تأثير جاذبيتها المتبادلة لتشكيل الكواكب التي نراها اليوم. بدأنا نفهم أن هذه العملية كانت عنيفة، حيث اصطدمت الكويكبات ببعضها البعض، بل وأحيانًا تسببت في تفكك الكواكب النامية نفسها. نتيجةً لتلك الاصطدامات العنيفة (والحرارة الناتجة عن العناصر المشعة فيها)، سُخّنت جميع الكواكب حتى أصبحت سائلة وغازية، وبالتالي تمايزت، مما يُساعد في تفسير بنيتها الداخلية الحالية.

كانت عملية الاصطدامات والتصادمات في النظام الشمسي المبكر معقدة، ويبدو أنها كانت عشوائية في كثير من الأحيان. يُمكن لنموذج السديم الشمسي تفسير العديد من الانتظامات التي نجدها في النظام الشمسي، لكن التصادمات العشوائية لمجموعات هائلة من الكويكبات قد تكون السبب وراء بعض الاستثناءات لـ"قواعد" سلوك النظام الشمسي. على سبيل المثال، لماذا يدور كوكبا أورانوس وبلوتو على جانبيهما؟ ولماذا يدور كوكب الزهرة ببطء وفي الاتجاه المعاكس لبقية الكواكب؟ ولماذا يُشبه تركيب القمر تركيب الأرض في نواحٍ عديدة،

ومع ذلك يُظهر اختلافات جوهرية؟ ربما تكمن إجابات هذه الأسئلة في تصادمات هائلة حدثت في النظام الشمسي قبل وقت طويل من بدء الحياة على الأرض.

دفعت الانتظامات بين الكواكب علماء الفلك إلى افتراض أن الشمس والكواكب تشكلت معًا في سحابة عملاقة دوارة من الغاز والغبار تُسمى السديم الشمسي. تُظهر الملاحظات الفلكية أقراصًا محيطة بالنجوم متشابهة بشكلٍ لافت. داخل السديم الشمسي، تجمعت المواد أولًا لتُشكّل كويكبات صغيرة؛ وتجمع العديد منها معًا لتكوين الكواكب والأقمار. أما الباقي فلا يزال يُرى على شكل مذنبات وكويكبات. من المحتمل أن جميع الأنظمة الكوكبية قد تشكلت بطرق متشابهة، لكن العديد من أنظمة الكواكب الخارجية تطورت على مسارات مختلفة تمامًا، كما سنرى في "العينات الكونية وأصل النظام الشمسي".

## اكتشف علماء الفلك بخار الماء في قرص يحيط بنجم فتي

تم اكتشاف بخار الماء في قرص تكوّن الكواكب حول نجم فتي، مما يكشف عن ظروف مواتية لتكوّن الكواكب وتأثيرات محتملة على تركيبها. وقد وجد الباحثون بخار الماء في القرص المحيط بنجم فتي[1]، تحديدًا في المنطقة التي يُحتمل أن تتشكل فيها الكواكب. يُعدّ الماء عنصرًا أساسيًا للحياة على الأرض، ويُعتقد أيضًا أنه يلعب دورًا هامًا في تكوّن الكواكب. مع ذلك، لم نتمكن حتى الآن من رسم خريطة لتوزيع الماء في قرص مستقر وبارد، وهو نوع القرص الذي يوفر الظروف الأمثل لتكوّن الكواكب حول النجوم. وقد أُتيحت هذه النتائج الجديدة بفضل مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)، التي يُعدّ المرصد الأوروبي الجنوبي (ESO) شريكًا فيها.

يقول ستيفانو فاكيني Stefano Facchini، عالم الفلك بجامعة ميلانو في إيطاليا، والذي قاد الدراسة المنشورة في 29 فبراير في مجلة "Nature Astronomy ": "لم أتخيل قط أننا سنتمكن من التقاط صورة لمحيطات من بخار الماء في نفس المنطقة التي يُحتمل أن يتشكل فيها كوكب". وتكشف الملاحظات عن وجود كمية من الماء تفوق ثلاثة أضعاف ما هو موجود في جميع محيطات الأرض في القرص الداخلي للنجم الشاب الشبيه بالشمس HL Tauri، والذي يقع على بُعد 450 سنة ضوئية من الأرض في كوكبة الثور.



من مرصد ألما. ما يُعرف بـ"أقراص ألما" كما تُرى بالأشعة تحت HL Tauri القرص الكوكبي الأولي لنجم الحمراء حول النجوم البعيدة Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NSF

عُثر على كمية كبيرة من الماء في المنطقة التي توجد بها فجوة معروفة في قرص نجم HL Tauri. تتشكل فجوات حلقية الشكل في الأقراص الغنية بالغاز والغبار بفعل الأجرام السماوية الفتية الشبيهة بالكواكب التي تدور حولها، حيث تجمع المواد وتنمو. يقول فاكيني: "تكشف صورنا الحديثة عن كمية كبيرة من بخار الماء على مسافات مختلفة من النجم، بما في ذلك فجوة يُحتمل أن

[1] Resolved ALMA observations of water in the inner astronomical units of the HL Tau disk" by Stefano Facchini, ( Leonardo Testi, Elizabeth Humphreys, Mathieu Vander Donckt, Andrea Isella, Ramon Wrzosek, Alain Baudry, Malcom D. Gray, Anita M. S. Richards and Wouter Vlemmmings, 29 February 2024, Nature Astronomy

يتشكل فيها كوكب في الوقت الحالي". يشير هذا إلى أن بخار الماء هذا قد يؤثر على التركيب الكيميائي للكواكب المتشكلة في تلك المناطق.

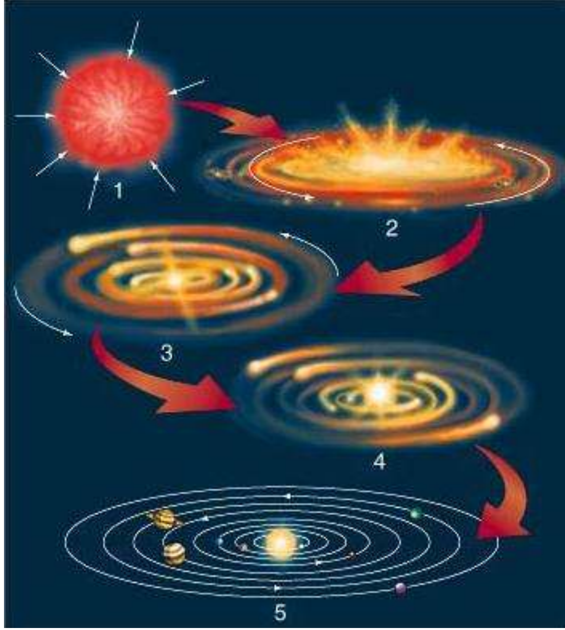
تقول إليزابيث همفريز، عالمة الفلك في المرصد الأوروبي الجنوبي (ESO) والتي شاركت أيضًا في الدراسة: "من المثير حقًا أن نشهد مباشرةً، من خلال صورة، جزيئات الماء وهي تنطلق من جزيئات الغبار الجليدية". تُعدّ حبيبات الغبار التي تُشكّل القرص بمثابة بذور تكوين الكواكب، حيث تتصادم وتتكتل لتُشكّل أجسامًا أكبر حجمًا تدور حول النجم. ويعتقد علماء الفلك أنه عندما تكون درجة الحرارة منخفضة بما يكفي لتجمّد الماء على جزيئات الغبار، تلتصق الأشياء ببعضها البعض بكفاءة أكبر، مما يُهيّئ بيئة مثالية لتكوين الكواكب. ويضيف فاكيني: "تُظهر نتائجنا كيف يُمكن أن يُؤثّر وجود الماء على تطوّر النظام الكوكبي، تمامًا كما حدث قبل حوالي 4.5 مليار سنة في نظامنا الشمسي".



اكتشف علماء الفلك بخار الماء في قرص يحيط بنجم فتي، تحديدًا في المنطقة التي يُحتمل أن تتشكل فيها الكواكب. تُظهر هذه الصورة، الملتقطة بواسطة مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA)، التي تُعدّ ESO شريكًا فيها، بخار الماء بألوان زرقاء متدرجة. بالقرب من مركز القرص، حيث يتواجد النجم الفتي، تكون البيئة أكثر سخونة والغاز أكثر سطوعًا. أما الحلقات ذات اللون الأحمر فهي عبارة عن رصد سابق من ALMA يُظهر توزيع الغبار حول النجم. حقوق الصورة: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/S. Facchini et al.

## نظرية السديم حالياً أقرب تفسير لتكوين المجموعة الشمسية

توجد عدة نظريات تحاول تفسير كيفية نشأة النظام الشمسي، لكن النظرية الأكثر قبولًا هي نظرية السديم. يعتقد علماء الفلك أن النظام الشمسي بدأ كسحابة كبيرة عديمة الشكل من الغاز والغبار والجليد، لكن شيئًا ما أدى إلى اضطراب هذه الكتلة وبدء الحركة، وانفجار نجم قريب. تشكل نظامنا الشمسي قبل حوالي 4.5 مليار سنة من سحابة كثيفة من الغاز والغبار بين النجوم. انهارت السحابة، ربما بسبب موجة الصدمة الناتجة عن انفجار نجم قريب يُسمى المستعر الأعظم. عندما انهارت سحابة الغبار هذه، تشكل سديم شمسي يدور حول نفسه. وبسبب هذا الدوران، يتخذ السديم الشمسي شكل قرص. في المركز، عندما جذبت الجاذبية المزيد والمزيد من المواد، كان الضغط في النواة هائلاً لدرجة أن ذرات الهيدروجين بدأت تتحد مع الهيليوم، مطلقةً كمية هائلة من الطاقة. وهكذا وُلدت شمسنا. عندما تشكلت الشمس في مركز هذا القرص وأصبحت شديدة الإضاءة، دُفع ما تبقى من الغاز والغبار بعيدًا بفعل ضغط الإشعاع الشمسي، وفي النهاية أصبح 99% من المادة متاحًا. كانت المادة في أطراف القرص تتكتل بشدة لدرجة أن هذه التكتلات اصطدمت ببعضها البعض، مكونةً أجسامًا أكبر فأكبر. تكثف الغبار والغاز المتطاير، مكونًا كواكب مختلفة تدور حول الشمس، بعضها أصبح كواكب قزمة وأقمارًا كبيرة. يتكون حزام الكويكبات من قطع من النظام الشمسي المبكر لم تتحول أبدًا إلى كوكب، وتحولت قطع أخرى متبقية إلى كويكبات ومذنبات ونيازك وأقمار صغيرة غير منتظمة.



## إعادة التفكير في أصول العوالم الغنية بالماء

حظيت فكرة الكواكب الخارجية الغنية بالماء، والمعروفة باسم "كوكب الهايس Hycean"[1]، باهتمام كبير بعد رصد تلسكوب جيمس ويب الفضائي للكوكب K2-18b، الذي يشبه كوكب نبتون، والذي يشير إلى وجود مؤشرات حيوية محتملة. ومع ذلك، لا يزال تفسير هذه الخصائص الطيفية وتصنيف K2-18b ككوكب من نوع الهايس محل جدل واسع، حيث تشير سيناريوهات بديلة إلى أنه قد يكون كوكبًا غنيًا بالغاز يشبه كوكب نبتون ويحتوي على محيط من الصهارة، مما يستبعد وجود محيط مائي صالح للحياة.

تستند فكرة احتواء بعض الكواكب الشبيهة بنبتون على طبقات واسعة غنية بالمواد المتطايرة إلى أعمال نظرية سابقة أجريت، والتى اقترحت أن الكواكب التي تشكلت خارج خط التجمد وهاجرت نحو الداخل يمكن أن تحتفظ بكميات كبيرة من الجليد المتطاير مثل الماء ($H_2O$). وتشير نماذج التكوين والتطور المشتركة إلى أن بعض الكواكب الشبيهة بنبتون قد تكون عوالم مائية (تصل نسبة الماء فيها إلى 50% من الكتلة) هاجرت نحو الداخل من خارج خط التجمد المائي حيث تصل نسبة السيليكات إلى الجليد إلى 1:1. وقد تنبأت العديد من الدراسات بوجود كواكب شبيهة بنبتون غنية بالماء قريبة من الكوكب. وعلى وجه الخصوص أنه في غياب الكواكب العملاقة، يمكن للأجرام الشبيهة بنبتون أن تهاجر نحو الداخل مع احتفاظها بعشرات النسب المئوية من وزنها من الماء، مُشكّلةً أغلفة غنية بالماء حتى في القرص الداخلي.

مع ذلك، يتمثل أحد القيود الأساسية لهذه الدراسات التكوينية في إهمالها لأي تفاعل كيميائي بين المواد المتطايرة والباطن العميق. وقد أظهرت الدراسات أن التفاعلات الكيميائية بين محيط الصهارة والغلاف الجوي قادرة على تغيير التركيب الكيميائي والتركيب الجوي للكواكب الشبيهة بنبتون بشكل ملحوظ.

على الرغم من أن العديد من الكواكب الشبيهة بنبتون المتطورة التي رُصدت قد تحوي حاليًا محيطات عميقة من الصهارة، يُعتقد أن جميع الكواكب العملاقة الشبيهة بالأرض والكواكب الشبيهة بنبتون قد مرت بهذه الحالة في مراحل مبكرة من تاريخها التطوري. أثناء تكوينها، يمكن للكواكب العملاقة الشبيهة بالأرض والكواكب الشبيهة بنبتون أن تتراكم عليها نسبة مئوية قليلة من غاز الهيدروجين والهيليوم، وهو ما يكفي، عند وجوده

[1] ( Aaron Werlen, Caroline Dorn, Remo Burn, Hilke E. Schlichting, Simon L. Grimm, and Edward D. Young, Sub-Neptunes Are Drier than They Seem: Rethinking the Origins of Water-rich Worlds, The Astrophysical Journal Letters, 991:L16 (9pp), 2025 September 20, Published by the American Astronomical Society

كغلاف خارجي، لحبس الحرارة المكتسبة خلال عملية التراكم. تصل درجات الحرارة الناتجة عند سطح التماس بين الغلاف الجوي ومحيط الصهارة إلى عدة آلاف من الكلفن أو أكثر، ويمكن لأغلفة الهيدروجين السميكة بصريًا أن تؤخر تصلب محيط الصهارة لفترات زمنية تصل إلى مليارات السنين. خلال هذه المراحل المطولة لمحيط الصهارة، يمكن للتفاعلات بين الغلاف الجوي والداخل أن تُغير بشكل كبير من تركيب الكواكب الشبيهة بنبتون وتطورها.

في هذه الدراسة، نحلل تأثير توازن الغلاف الجوي مع محيط الصهارة على محتوى الماء في الكواكب الخارجية الفتية القريبة من نبتون. نحسب حالات التوازن الكيميائي الشاملة لعينة كبيرة من الكواكب الاصطناعية المُولَّدة بواسطة نموذج توليف التجمعات الكوكبية. تتنوع هذه الكواكب في تركيبها الكيميائي، ونسب كتل غلافها، ومسافاتها المدارية. تم استخلاص هذه التجمعات من عمليات المحاكاة مباشرةً بعد تشتت القرص، وبالتالي فهي تمثل تجمعًا فتيًا وساخنًا، حيث تُعد محيطات الصهارة سيناريوًا محتملاً. ثم نقارن نسب كتل الماء المتوازنة بالقيم المتراكمة المتوقعة بواسطة نموذج توليف التجمعات، مما يُتيح تقييم كيفية تعديل مخزون الماء الكلي بفعل التفاعلات بين الغلاف الداخلي والغلاف الجوي. بالإضافة إلى الخصائص الكلية، نستخلص نسبة كتلة الماء ($H_2O$) في غلاف كل كوكب من التركيب المتوازن، ونحلل كيفية تغيرها مع المسافة المدارية والخصائص الكلية. أخيرًا، نحلل قابلية امتزاج الماء ($H_2O$) والهيدروجين ($H_2$) في أغلفة هذه التجمعات.

تشير نتائجنا، التي تركز على المجموعة الأولية (المولودة) من الكواكب الشبيهة بنبتون ذات المحيطات الصهارية، إلى أن نسب الماء فيها لا تتحدد أساسًا بتراكم الحصى الجليدية أثناء التكوين، بل بالتوازن الكيميائي بين الغلاف الجوي البدائي والباطن المنصهر. لا يحتفظ أي من الكواكب في نموذجنا، بغض النظر عن محتواه الأولي من الماء، بأكثر من 1.5% من وزنه ماءً بعد التوازن الكيميائي. وهذا يستبعد نسب الماء العالية (10-90% من الوزن) التي تفترضها سيناريوهات العوالم الهيسية، حتى بالنسبة للكواكب التي تراكمت فيها في البداية ما يصل إلى 30% من الماء من حيث الكتلة. تتوافق هذه النتائج مع دراسات حديثة تشير إلى أن كمية صغيرة فقط من الماء يمكن إنتاجها أو الاحتفاظ بها داخليًا في الكواكب الشبيهة بنبتون والكواكب العملاقة الأرضية.

على الرغم من انخفاض مخزون الماء الكلي في هذه الكواكب، فإن مجموعة فرعية منها تُكوّن أغلفة صغيرة غنية بالماء. هذه كواكب فقيرة بالهيدروجين والكربون، تشكلت داخل خط الجليد، حيث لم تتراكم عليها أي جليد، وتراكمت عليها كمية أقل من الهيدروجين مقارنةً بالكواكب التي تشكلت خارجه. تُهيمن على أغلفة هذه الكواكب

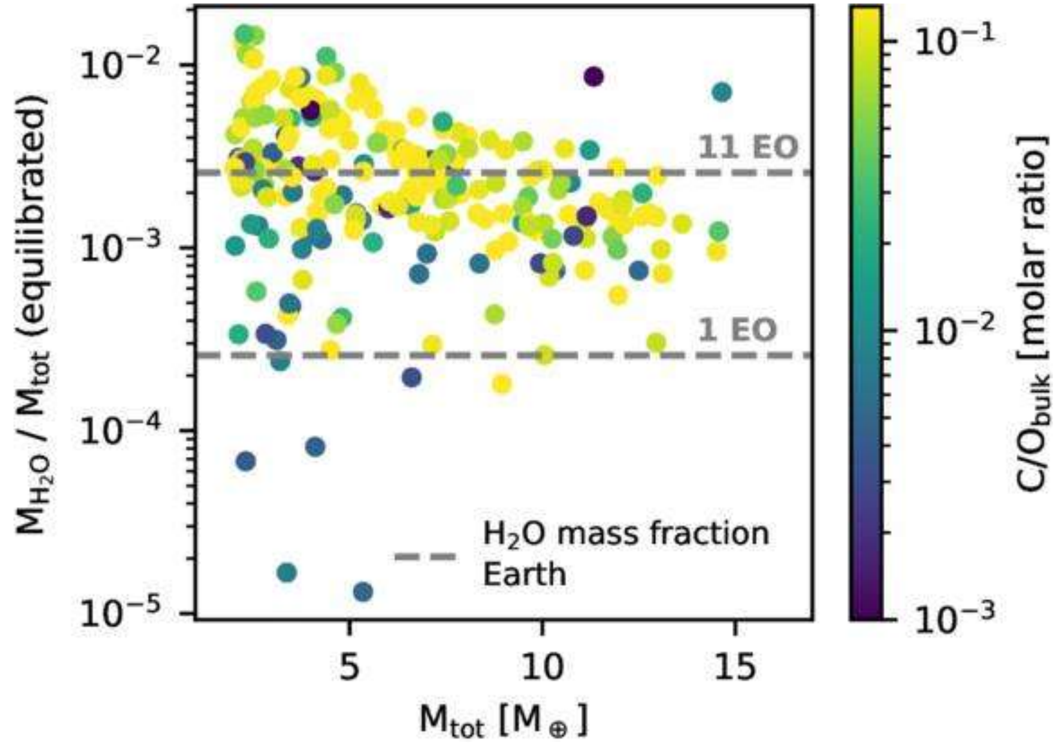
الصغيرة الفقيرة بالهيدروجين أنواعٌ متطايرة ثانوية، مما يؤدي إلى ارتفاع نسبة الماء فيها رغم انخفاض محتواها المطلق من الماء. تتوافق هذه النتيجة بشكل عام مع التوقعات التي تقترح وجود أغلفة جوية يهيمن عليها الماء، بضغوط سطحية تتراوح بين $10^{-5}$ و0.2 GPa جيجا باسكال للكواكب ذات الفترات المدارية الأقصر من 100 يوم. تتشكل هذه الأغلفة الجوية من خلال أكسدة فعالة لغلاف جوي بدائي غني بالهيدروجين بواسطة محيط من الصهارة، يتبعها هروب الغلاف الجوي. نلاحظ الاتجاه نفسه في نتائجنا، على الرغم من أننا لم نأخذ في الحسبان هروب الغلاف الجوي.

إضافةً إلى إهمال التسرب الجوي، فإننا نحلل فقط النوى المتكونة حديثًا ولا نأخذ في الحسبان فقدان الكتلة المجزأ، الذي قد يُغير تركيب الغلاف على مدى فترات زمنية طويلة من خلال فقدان الهيدروجين بشكل تفضيلي. كما يُعيد النموذج إنتاج الاتجاهات التركيبية الرئيسية التي وردت في دراسات سابقة، مثل الاعتماد الشديد لنسب الكربون إلى الأكسجين والأكسجين إلى الهيدروجين في الغلاف الجوي على نسبة كتلة الغلاف.

تتوافق نسب كتلة الماء المنخفضة في دراستنا بشكل عام مع التقديرات العليا لمحتوى الماء في باطن الأرض. تشير النماذج الجيوكيميائية والجيوفيزيائية إلى إمكانية تخزين ما يصل إلى 10 أضعاف محيطات الأرض (EO) من الماء في الوشاح، حيث يعادل المحيط الواحد $1.4 \times 10^{21}$ كجم. وكما هو موضح في الشكل 5، تتراوح نسب كتلة الماء بعد الوصول إلى حالة التوازن بين $10^{-3}$–1.5 wt%، بمتوسط 0.27% وزناً، متداخلةً مع النطاق المقدر لمحتوى الماء في الأرض (0.025-0.25% وزناً). ينشأ الارتباط العكسي بين كتلة الكوكب ونسبة كتلة الماء العليا في الكواكب ذات نسبة الكربون إلى الأكسجين العالية من كيفية توزيع الأكسجين أثناء التوازن بين باطن الكوكب وغلافه الجوي. فعلى الرغم من توفر كمية أكبر من الأكسجين في الكواكب ذات الكتلة الأعلى، إلا أن جزءاً أكبر منه يُحتجز في الطور المعدني، مما يُبقي وفرة الأكسجين ثابتة تقريباً مع كتلة الكوكب في طوري السيليكات والغاز. ونتيجة لذلك، تظل كتلة $H_2O$ المطلقة ثابتة تقريبًا عبر المجموعة، بينما ينخفض الكسر النسبي لكتلة $H_2O$ مع زيادة كتلة الكوكب.

فى الشكل الموضضح أسفل نسبة كتلة الماء المتوازنة كدالة لكتلة الكوكب الكلية. يشير شريط الألوان إلى النسبة المولية molar ratio للكربون إلى الأكسجين. تُحدد الخطوط الرمادية المتقطعة التقديرات الدنيا والعليا لنسبة كتلة الماء على الأرض، والتي تُعادل محيطًا واحدًا و11 محيطًا أرضيًا على التوالي. يتوافق هذا التقدير جيدًا مع نتائجنا، مما يُشير إلى أن محتوى الماء في الكواكب الأصغر من نبتون يتوافق بشكل عام مع الحد الأعلى

لمحتوى الماء على الأرض. يظهر ارتباط سلبي بين كتلة الكوكب ومحتوى الماء للكواكب ذات نسب الكربون إلى الأكسجين العالية.



## وفرة المياه من المستعرات العظمى البدائية عند تكوين الكون

من المرجح أن تكون نوى السحب الغنية بالمعادن الناتجة عن انفجارات المستعرات العظمى من النوع الثالث هي المواقع الرئيسية لتكوّن الماء في معظم الهالات البدائية[1]، إذ أن التشابه في ديناميكيات الانفجار كان سيؤدي إلى تكوين تجمعات كثيفة عبر نطاق واسع من الطاقات وكتل النجوم الأصلية وكتل الهالة. وبالتالي، فإن الظروف التي تُفضّل تكوّن هذه النوى، مثل عمليات الاندماج الكبيرة أو الانفجارات في مناطق الهيدروجين المتأين المحصورة، تُعظّم إنتاج الماء البدائي. تميل المستعرات العظمى في مناطق الهيدروجين المتأين المدمجة إلى تكوين تجمعات لأن عدم الاستقرار الديناميكي في المقذوفات المتمددة يتشكل مبكرًا، وتتوقف الصدمة في أوقات أبكر في الكثافات المحيطة الأعلى. مع ذلك، لا يزال بإمكان الانفجارات تكوين نوى كثيفة حتى لو اندفع تدفق الأشعة فوق البنفسجية المؤينة من النجم خارج الهالة، وفُقدت معظم الباريونات في تدفقات الشمبانيا، لأن التباينات في منطقة الهيدروجين المتأين لا تزال قادرة على حصر الإشعاع على طول بعض خطوط الرؤية.

اعتبرنا تكوّن نجم واحد فقط في كل هالة الحالة الأبسط. قد تتكوّن عدة نجوم أيضًا. في هذه الحالة، قد تحدث عدة انفجارات مستعرات عظمى وتتداخل في الهالة. قد تُدمّر هذه الانفجارات الماء مؤقتًا في المناطق منخفضة الكثافة، لكننا نتوقع أن النوى الكثيفة، حيث يتكوّن معظم الماء، ستنجو من الأشعة فوق البنفسجية المؤينة والمستعرات العظمى من النجوم الأخرى، تمامًا كما نجا التكتل الكثيف على بُعد 30 فرسخًا فلكيًا من النجم ذي الكتلة $13\ M_{\odot}$ من إشعاعه وانفجاره. قد تُنتج عدة انفجارات نوى أكثر كثافة، وبالتالي مواقع أكثر لتكوّن الماء وتركيزه في الهالة.

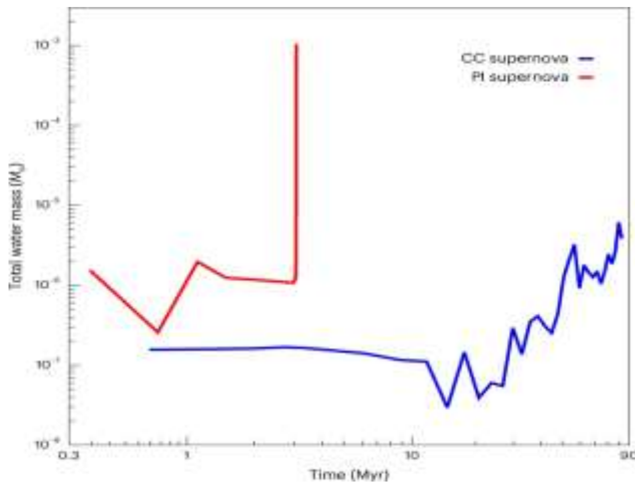
عندما تتشكل النجوم في النوى لاحقًا، يُمكن للغبار إعادة معالجة إشعاعها وملء مستويات شبه مستقرة في الماء ($H_2O$) تُنتج انبعاثات ليزرية عند 22 GHz. مع لمعان يتراوح بين $10^{-3}\ L_{\odot}$ to $10^{3}\ L_{\odot}$ (حيث $L_{\odot}$ هو لمعان الشمس)، فمن المُحتمل ألا يكون انبعاث الخطوط المُزاح نحو الأحمر من الليزرات الفردية عند $z \approx 20$ مرئيًا لمصفوفة الكيلومتر المربع أو مصفوفة الجيل التالي الكبيرة جدًا اليوم. مع ذلك، قد يكون وجود مجموعة عالمية من هذه الليزرات قد أنتج خلفية طيفية كونية في نهاية العصور المظلمة الكونية، والتي يمكن لهذه المراصد

[1] D. J. Whalen, M. A. Latif & C. Jessop, Abundant water from primordial supernovae at cosmic dawn, Nature (2025) Astronomy volume 9, pages741–746

رصدها في العقد القادم. وينطبق الأمر نفسه على خطوط الموجات المليمترية المنبعثة من الهالات، والتي يتم ضخها بالأشعة تحت الحمراء البعيدة، والتي يمكن رصدها بواسطة مرصد ألما.

كما هو موضح في البيانات الموسعة، تُظهر محاكاة إنزو Enzo أن هذه الأقراص كانت غنية جدًا بالماء البدائي، بنسب كتلية أعلى بعشرة إلى ثلاثين ضعفًا من تلك الموجودة في السحب المنتشرة في مجرة درب التبانة في CC supernova core نواة المستعر الأعظم CC، وأقل ببضعة أضعاف فقط من تلك الموجودة في النظام الشمسي اليوم في نواة المستعر الأعظم PI. وتُشير النسب الكتلية العالية لجزيئات الماء ($H_2O$) وإمكانية تكوّن نجوم منخفضة الكتلة في نواة المستعر الأعظم PI إلى احتمال وجود منطقة صالحة للسكن في القرص الكوكبي الأولي، حيث تسمح درجات الحرارة المتوازنة بوجود الماء في الحالة السائلة. وإذا كان من الممكن أن تتشكل الكواكب الصغيرة عند $Z = 0.04\ Z_\odot$ في القرص، فإن الكواكب التي تنمو لتصبحها قد تحتوي على الماء.

تشير محاكياتنا إلى وجود الماء في المجرات البدائية نتيجة لتكوّنه المبكر في هالاتها المكونة لها. وقد تصل نسبة كتلة الماء في بقايا المستعرات العظمى المنتشرة التي استوعبتها هذه المجرات إلى $10^{-10}$، أي أقل بعشر مرات فقط مما هي عليه في مجرتنا درب التبانة اليوم. وقد تفكك جزء من هذا الماء ضوئيًا بفعل النجوم الضخمة ذات المحتوى المعدني المنخفض في هذه المجرات، أو دُمر بفعل تفاعلات كيميائية أخرى عندما بلغت مستويات أعلى من المحتوى المعدني في مراحل لاحقة. ومع ذلك، فإن ازدياد نسبة الغبار في المجرات المبكرة كان من شأنه أن يحمي الماء من الأشعة فوق البنفسجية ويخفف من تدميره إلى حد ما. ولا يزال تحديد كمية الماء التي نجت من بيئات الإشعاع القاسية في المجرات الأولى أمرًا قيد البحث.




الشكل يوضح إجمالي كتل الماء في المستعرات العظمى من نوع CC (باللون الأزرق) و PI (باللون الأحمر) كدالة للزمن منذ الانفجار. يهيمن على إجمالي كتل الماء عملية التخليق في نوى السحب الكثيفة في هالاتها الخاصة في المراحل المتأخرة. يرتفع تكوين الماء بشكل حاد في المراحل المبكرة في نواة المستعر الأعظم من نوع PI لأن فترات التبريد والانهيار تكون أقصر عند مستويات معدنية أعلى.

## تخليق مياه الأرض خلال المراحل الأولى لتكوين النظام الشمسي؟

بدأ تكوين الأرض قبل 4.6 مليار سنة، في القرص الكوكبي الأولي الذي نشأ منه نظامنا الشمسي، وهو ما يُعرف بالسديم الشمسي الأولي. في النظام الشمسي، يوجد الماء، أو ما يُعادل الماء بشكل أعم بالنسبة للمركبات الحاملة للهيدروجين (مثل الماء الجزيئي $H_2O$، والهيدروكسيل OH، والهيدروجين الجزيئي $H_2$)، في جميع أنواع الأجرام، من الكواكب الصخرية الداخلية والكويكبات إلى طبقة التروبوسفير للكواكب العملاقة الخارجية وأقمارها، وكذلك في المذنبات. ومع ذلك، فإن أصله على الأرض، سواءً أكان مكتسبًا أثناء تكوينها محليًا أو في مكان آخر أو حتى بعد اكتمال تكوينها، لا يزال موضوعًا مثيرًا للجدل.

هناك إجماع على أن الماء الجزيئي تشكّل في معظمه على حبيبات غبار متناهية الصغر في المراحل الأولى لتكوّن النظام الشمسي[1]، في مرحلة السحابة الجزيئية وما قبل النجوم، حيث بقي متجمداً على الغلاف الجليدي المحيط بالحبيبات. ومع مرور الوقت، تكتلت هذه الحبيبات ونمت، مُشكّلةً كواكب صخرية وكويكبات ومذنبات، وغيرها من الأجرام الصغيرة التي تُشكّل النظام الشمسي حالياً. ومع ذلك، عندما ارتفعت درجة حرارة القرص مع تكوّن الشمس، تسامي الماء من أسطح الحبيبات نحو الداخل إلى ما يُسمى بخط الثلج - جبهة تكثف الماء. تسبب هذا في استنزاف القرص الداخلي من الماء الذي لم يكن محتجزاً بالفعل في أجرام أكبر. وبالتالي، أشارت نماذج تكوّن النظام الشمسي القياسية إلى أن الأرض تراكمت من مادة القرص الداخلي الجافة، مما يعني أن مياهها لا بد أنها وصلت إليها من مصادر خارجية من مدار الأرض.

يعتمد النهج التقليدي لتحديد خط الثلج على درجة حرارة تكثيف واحدة للماء، تُفترض أنها 180 كلفن. مع ذلك، يعتمد تبخر الجزيء المتجمد بشكل حاسم على قوة امتزازه adsorbing على سطح الحبيبات، والتي تُعرف بطاقة الربط (BE)، وهذه القيمة ليست ثابتة، إذ تعتمد على اختلاف اتجاهات الجزيئات على مواقع الامتزاز المختلفة على السطح. وفيما يتعلق بخط ثلج الماء، أظهرت حسابات كيميائية كمية نظرية حديثة أجراها ل. تيناتشي L. Tinacci وآخرون أن طاقة ربط الماء على سطح جليدي تتبع التوزيع الغاوسي Gaussian، مع مساهمة ملحوظة لطاقة ربط ذات قيم أكبر من تلك المُعتمدة عادةً في نماذج السدم الكوكبية الأولية. كما أظهر هؤلاء

---

[1] Lise Boitard-Crépeau, Cecilia Ceccarelli, Pierre Beck, Lionel Vacher, and Piero Ugliengo, Was Earth's Water Acquired Locally during the Earliest Phases of the Solar System Formation?, The Astrophysical Journal Letters, 987:L25 (7pp), 2025 July 10, Published by the American Astronomical Society

الباحثون أن تبخر الماء على قرص كوكبي أولي عام يحدث على منطقة ممتدة، عند النظر في توزيع طاقة الربط المحسوب. بعبارة أخرى، فإن المفهوم التقليدي لخط الثلج، المُعرّف على أنه انتقال مفاجئ، غير مناسب، ومن الأنسب الحديث عن "منطقة انتقالية للماء".

نؤكد أن القيم التي تتراوح بين 2–20 × $10^{-4}$ أكبر من تلك المقاسة في الأرض والكوندريتات والمذنبات، لذا يجدر بنا فهم مدى توافقها مع الأخيرة. مع ذلك، نلاحظ أنها تشير إلى مجمل جليد الماء المتسامي في الكوريونات الساخنة، وهي المناطق التي تكون فيها درجة حرارة الغبار أعلى من درجة حرارة تسامي كتلة الجليد. وبالمثل، فإن عمليات الرصد الحديثة لجزيئات HDO المتجمدة حول النجوم الفتية تعطي نسبًا تبلغ حوالي $10^{-3}$~. من المهم الإشارة هنا إلى أن كلا النوعين من الرصد، بحكم التعريف، يوفران متوسط نسبة $[HDO]/[H_2O]$ على جميع طبقات الجليد، وهما غير حساسين تمامًا لتدرجها عبر الطبقات المختلفة. من ناحية أخرى، تشير التقديرات إلى أن جليد الماء يتكون من حوالي 100 إلى 200 طبقة، تتشكل منذ بداية تكوين السحابة الجزيئية وحتى مرحلة ما قبل الانهيار الأكثر كثافة. وبالتالي، لا تمتلك هذه الطبقات نفس قيمة $[HDO]/[H_2O]$: فالطبقات الأقدم، الأقرب إلى الأسطح المقاومة للحرارة، أقل احتواءً على الديوتيريوم بكثير من تلك الموجودة في الطبقات الخارجية، التي تشكلت عندما كانت درجات الحرارة منخفضة وكان أول أكسيد الكربون متجمدًا أيضًا. لذلك، من المحتمل أن تكون الطبقات الأولى من جليد الماء، حيث يُرجح وجود معظم مواقع الطاقة العالية، أقل احتواءً على الديوتيريوم، بما يتوافق مع قيمة VSMOW. تفسير آخر إضافي هو أن النظام الشمسي يُعتقد أنه نشأ في بيئة مكتظة، بالقرب من نجوم ضخمة سخّنت المنطقة. في هذه المناطق، يكون احتواء الجزيئات على الديوتيريوم أقل منه في النجوم الأولية من الفئة I/0 المذكورة أعلاه. وبالتالي، قد تتوافق نسبة احتواء الماء على الديوتيريوم في الأرض مع طبقات الجليد الأولية المتكونة في النوى ما قبل النجمية الباردة نسبيًا.

باختصار، في ضوء المناقشة السابقة، من الممكن أن يكون الماء الأرضي قد ورثه من حبيبات الجليد في مدار الأرض، أي محليًا. بالإضافة إلى ذلك، يتفق هذا مع أحدث الاقتراحات التي تفيد بأن الملوثات البيئية هي اللبنات الأساسية للأرض، والتي تشكلت بالقرب من مدار الأرض وتمتلك نسبة D/H مماثلة لتلك الموجودة في مياه الأرض.

في هذا العمل، قمنا بنمذجة توزيع جليد الماء في السديم النجمي الأولي باستخدام منهج حركي يعتمد على توزيع طاقة ربط الماء المحسوب بواسطة ل. تيناشي. أظهرنا أن الماء يتسامى تدريجيًا، على خط ثلجي منتشر، متجاوزًا المفهوم الكلاسيكي لخط ثلجي حاد عند 180 كلفن. نجح نموذجنا، بدرجة حرارة تتراوح بين 145 و200 كلفن عند وحدة فلكية واحدة، في محاكاة أعلى وأدنى تقديرات محتوى الماء على الأرض، ويتوافق مع اتجاهات محتوى الماء المرصودة عبر مجموعات النيازك الكوندريتية في مواقع تكوينها المتوقعة. تتوافق درجة الحرارة المستنتجة البالغة 200 كلفن عند وحدة فلكية واحدة مع درجة الحرارة المقاسة في المراحل النجمية الأولية من الفئة 1/0 عند هذه المقاييس، عند معايرتها $0.5\ L_{\odot}$. يشير هذا إلى أنه عندما وصل لمعان الشمس الفتية من الفئة 0 إلى حوالي $0.5\ L_{\odot}$، فإن معظم الجليد الذي ورثته الأرض في نهاية المطاف كان محصورًا داخل حبيبات غبار متكتلة كبيرة. باختصار، تشير هذه النتائج إلى أن جزءًا كبيرًا من ماء الأرض ربما يكون قد نشأ محليًا، دون الحاجة إلى وصوله من خارج خط التجمد التقليدي.

## يكشف علماء الفلك عن صلة جديدة بين الماء وتكوين الكواكب

يُعدّ جزيء الماء عنصرًا أساسيًا في تكوين الأنظمة الكوكبية، حيث يُمثّل خط تجمد الماء موقعًا مثاليًا لنموّ النوى الكوكبية الضخمة. نعرض هنا بيانات مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر للقرص الكوكبي الأولي الحلقي الذي يدور حول النجم الفتيّ HL Tauri، والتي تُظهر انبعاثًا ساطعًا مركزيًا ناتجًا عن ثلاثة انتقالات متميزة لنظير الماء الرئيسي ($H^{16}{}_2O$). يكشف محتوى الماء، المُحلّل مكانيًا وطيفيًا، عن الغاز في نطاق حراري يصل إلى درجة حرارة تسامي الماء. يُشير تحليلنا إلى حدّ أدنى صارم يبلغ 3.7 محيطات أرضية من بخار الماء المُتاح ضمن الوحدات الفلكية الداخلية السبعة عشر للنظام. نُبيّن أن مُلاحظاتنا تقتصر على استكشاف محتوى الماء في غلاف القرص الجوي، نظرًا لكثافة عمود الغبار العالية وامتصاصه، ونُشير إلى أن نظير الماء الرئيسي هو أفضل مُتتبّع لتحليل بخار الماء مكانيًا في الأقراص الكوكبية الأولية[1].

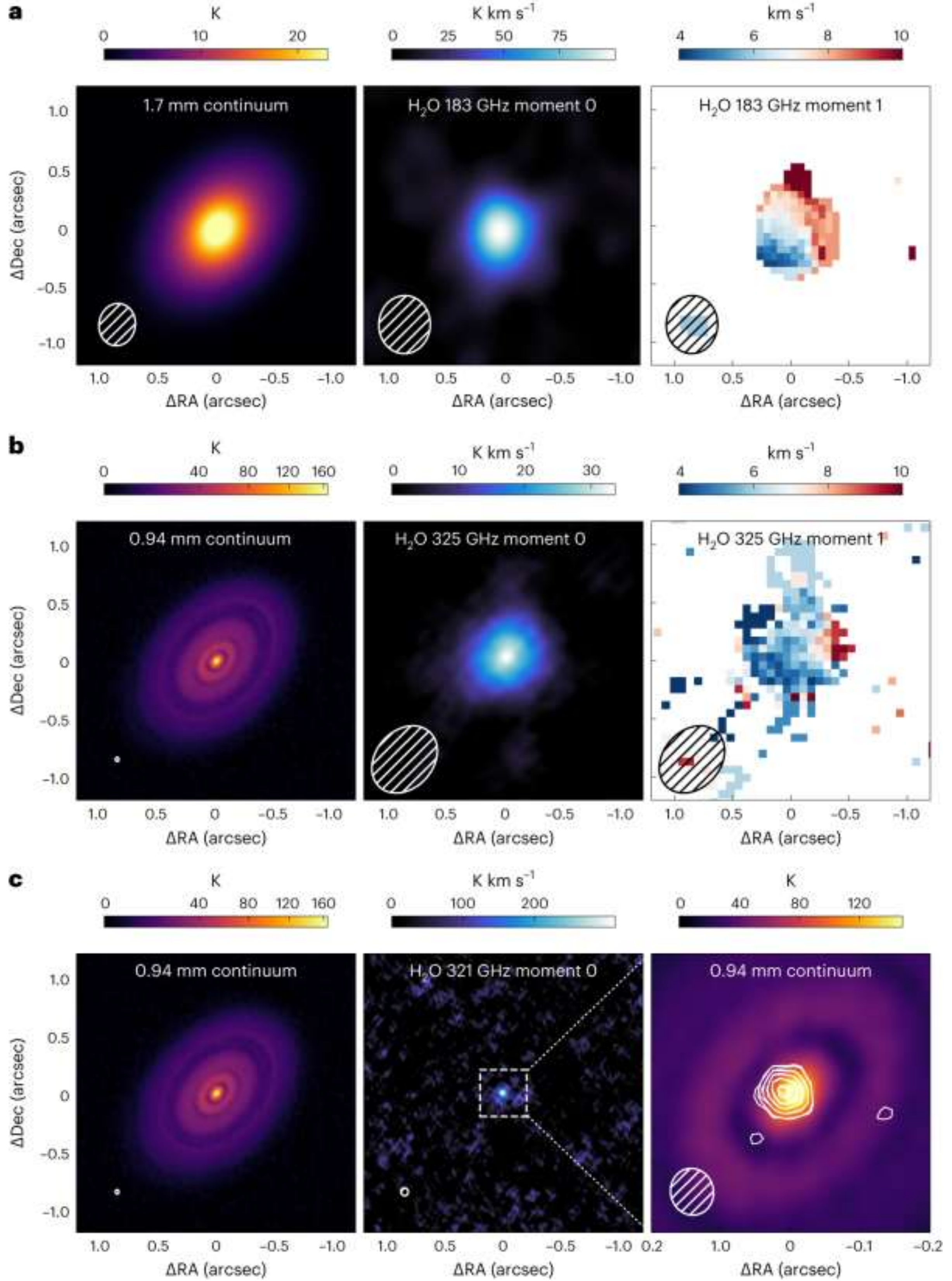
يركز هذا البحث على حالة HL Tau النموذجية، وهي أول قرص كوكبي أولي تم تصويره بدقة زاوية عالية جدًا (حوالي 0.025 ثانية قوسية) باستخدام مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/تحت المليمتر (ALMA). يُظهر القرص نمطًا مذهلاً من الحلقات متحدة المركز. نظرًا لأن المصدر حديث نسبيًا (أقل من مليون سنة$\lesssim$1 Myr ) وكتلته النجمية الديناميكية عالية نسبيًا ($2.1 M_\odot \pm 0.2$ )، فمن المتوقع أن تكون درجات حرارة القرص الداخلي دافئة، نتيجةً للإشعاع والتسخين الناتج عن التراكم. تم رصد الماء الدافئ والساخن في HL Tau بواسطة مرصد هيرشل Herschel في نطاق الأشعة تحت الحمراء البعيدة، وبواسطة مطيافية عالية الدقة أرضية في نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة، مع عدم القدرة على فصل الخطوط مكانيًا. تم رصد ثلاثة خطوط مائية دورانية في المناطق الداخلية من القرص الكوكبي الأولي HL Tau، تم الحصول عليها باستخدام ALMA. تم تحليل الخطوط الطيفية بدقة عالية. ويؤكد تحليل بيانات التداخل أن نطاق انبعاث الماء محصور ضمن فجوة بارزة في شدة طيف HL Tau المستمر. تقدم هذه البيانات صورًا مكانية دقيقة لانبعاث نظير الماء الرئيسي ($H_2O$) في قرص كوكبي أولي، مما يمهد الطريق لاستراتيجية رصد جديدة لتحديد محتوى بخار الماء في مناطق تكوين الكواكب الأرضية.

---

[1] ) Stefano Facchini, Leonardo Testi, Elizabeth Humphreys, Mathieu Vander Donckt, Andrea Isella, Ramon Wrzosek, Alain Baudry, Malcom D. Gray, Anita M. S. Richards & Wouter Vlemmings, Resolved ALMA observations of water in the inner astronomical units of the HL Tau disk, Nature Astronomy volume 8, pages 587–595 (2024)

تكشف بيانات مرصد ألما الجديدة عن رصدٍ بالغ الأهمية لثلاثة تحولات دورانية متميزة للنظير الرئيسي لبخار الماء في المناطق الداخلية لقرص تاو الحلقي HL. تمهد هذه الملاحظات الطريق لتوصيف محتوى الماء في المناطق الداخلية للأقراص الكوكبية الأولية. توفر الدقة الزاوية والحساسية الهائلة لتلسكوب ألما، حتى في النطاقات الطيفية ذات النقل الجوي المنخفض، صورًا مكانية وطيفية لبخار النظير الرئيسي للماء في قرص تكوّن الكواكب. تشير تحليلات شكل انبعاث الماء، وطيف خط أعلى نسبة إشارة إلى ضوضاء، وظروف الإثارة مجتمعةً إلى أن خطوط الموجات المليمترية (أو شبه المليمترية) تستكشف الغاز الدافئ في الطبقات العليا من القرص فوق سطح ثلج الماء، مع انخفاض تدريجي في درجة الحرارة شعاعيًا. عدم رصد ($H^{18}{}_2O$) وانخفاض نسبة الماء إلى الغبار في نطاق 17 وحدة فلكية الداخلية يُشير إلى أن عمليات الرصد تستكشف غازًا سميكًا بصريًا بشكل هامشي فوق انبعاث طيف الغبار المتصل المعتم. تُبرز هذه النتائج أن محتوى الماء في الأقراص الكوكبية الأولية الهادئة عند أطوال موجية (دون) مليمترية يُمكن الكشف عنه بكفاءة عالية من خلال استهداف النظير الرئيسي، لا سيما في الأقراص ذات الأعماق البصرية المتصلة العالية ضمن خط تجمد الماء.

فى الشكل الموضح أسفل : **a**، يسارًا: صورة متصلة بطول موجي 1.7 مم لنجم HL Tau. في المنتصف: خريطة شدة متكاملة لخط الماء عند تردد GHz183 . يمينًا: خريطة سرعة مرجحة بالشدة لخط الماء عند تردد GHz183 بعد تطبيق قطع σ4 على القنوات الفردية، حيث تم رصد دوران القرص بوضوح. **b**، نفس الصورة **a**، للطيف المتصل عند طول موجي 0.94 مم وخط الماء عند تردد GHz325 . تم حساب خريطة السرعة المرجحة بالشدة في هذه الحالة بعد تطبيق قطع 3σ. **c** ، يسارًا وفي المنتصف، نفس الصورة **a** ، للطيف المتصل عند طول موجي 0.94 مم وخط الماء عند تردد GHz321 . لم يتم عرض خريطة اللحظة 1 نظرًا لانخفاض نسبة الإشارة إلى الضوضاء. يمينًا، تكبير لشدة الطيف المتصل، مع خطوط σ[4,5,6,7,8] لخريطة العزم الصفري لخط GHz321 ، حيث $\sigma$ = 13.3 mJy beam$^{-1}$ km s$^{-1}$. يبلغ متوسط الجذر التربيعي للخطأ r.m.s المرتبط بخرائط الشدة المتكاملة لخطي 183 وGHz325 ، على التوالي، 28.2 و46.3 mJy beam$^{-1}$ km s$^{-1}$. شدة السطوع (K). الشدة المتكاملة (K km s$^{-1}$). السرعة الموزونة بالشدة على طول خط الرؤية (km s$^{-1}$). المسافة من مركز الطور في المطلع المستقيم (ΔRA). المسافة من المركز نفسه في الميل (ΔDec).


a
K
0
10
20
K km s-1
0
25
50
75
km s-1
4
6
8
10
1.7 mm continuum
H2O 183 GHz moment 0
H2O 183 GHz moment 1
ΔDec (arcsec)
ΔRA (arcsec)
1.0
0.5
0
-0.5
-1.0
b
K
0
40
80
120
160
K km s-1
0
10
20
30
km s-1
4
6
8
10
0.94 mm continuum
H2O 325 GHz moment 0
H2O 325 GHz moment 1
c
K
0
40
80
120
160
K km s-1
0
100
200
K
0
40
80
120
0.94 mm continuum
H2O 321 GHz moment 0
0.94 mm continuum
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2

## تكشف التجارب عن توليد كميات هائلة من الماء أثناء تكوين الكواكب

إن أكثر أنواع الكواكب وفرةً التي تم اكتشافها في المجرة ليس لها نظير في نظامنا الشمسي، ويُعتقد أنها تتكون من باطن صخري مع غلاف سميك يهيمن عليه الهيدروجين. وقد تنبأت النماذج بأن التفاعل بين الهيدروجين الجوي ومحيط الصهارة الموجود أسفله يمكن أن يؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من الماء. ومع ذلك، تعاني النماذج من النقص الحالي في البيانات التجريبية حول التفاعل بين الهيدروجين وصهارة السيليكات عند الضغوط ودرجات الحرارة العالية. هناك نتائج تجريبية جديدة مصممة لدراسة هذا التفاعل. أُجريت تجارب خلية diamond anvil cell المُسخّنة بالليزر بين 16 و60 جيجا باسكال عند درجات حرارة أعلى من 4000 كلفن. وجد أن كميات وفيرة من الهيدروجين تذوب في صهارة السيليكات مع اعتماد كبير على درجة الحرارة أكثر من الضغط. كما وجدنا أن اختزال أكسيد الحديد يؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من الماء إلى جانب تكوين فقاعات غنية بالحديد بشكل عام، تتوقع النتائج أن العمليات النموذجية المصاحبة لتكوين الكواكب ستؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من المياه مع تداعيات على التركيب الكيميائي وبنية باطن الكوكب وكذلك الغلاف الجوي[1].

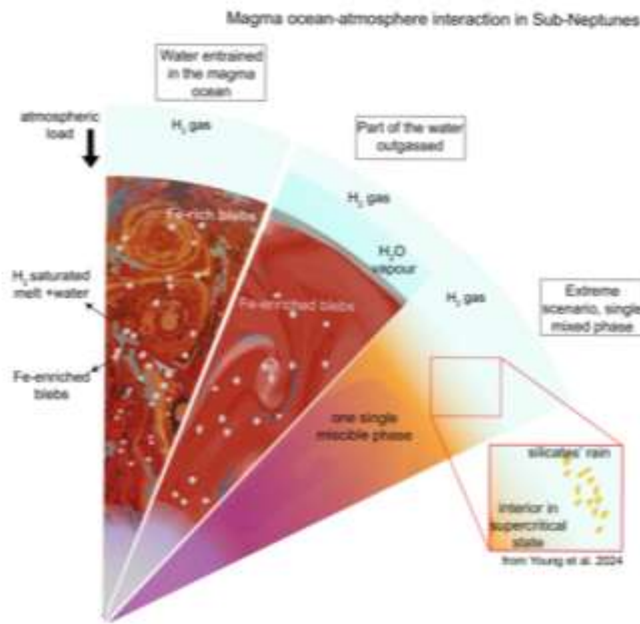
يلعب الهيدروجين، المكون الرئيسي للأغلفة الجوية الأولية، دورًا أساسيًا في تراكم الكواكب. ويحدد تفاعله مع باطن الكوكب - وخاصة محيط الصهارة الساخنة - الشروط الحدية للتطور الكيميائي، مما يؤثر على بنية الكوكب وديناميكياته، ويمثل مرحلة حاسمة في تكوينه. والجدير بالذكر أنه يُقترح أن يهيمن تفاعلان رئيسيان على هذه المرحلة من التراكم. يتضمن الأول اختزال FeO في الصهارة من خلال التفاعل مع $H_2$ الجوي، لتكوين Fe و$H_2O$ وفقًا للمعادلة $FeO + H_2 = Fe + H_2O$. أما الثاني فيتضمن دخول الهيدروجين إلى صهارة السيليكات عبر التوازن: $H_2^{gas} = H_2^{melt}$. ويعتمد مدى التغيير الذي يمكن أن تحدثه هذه التفاعلات في باطن الكوكب بشكل أساسي على ذوبانية الهيدروجين في الصهارة وكيفية تغيرها مع الضغط ودرجة الحرارة يُعد تقييد الذوبان أمرًا أساسيًا لأن مصهور السيليكات يمكن أن يعمل كمستودع للهيدروجين، ويحبسه في الوشاح. هناك، من بين تفاعلات أخرى، يمكن للهيدروجين أن يختزل أنواعًا أخرى لإنتاج الماء، الذي يمكن أن يتوزع بعد ذلك بين مصهور السيليكات والغلاف الجوي العلوي. وقد تم التعرف على التكوين الذاتي للماء من خلال هذا التفاعل كاحتمال ولكنه لم يتم إثباته بعد في المختبر.

---

[1] F. Miozzi, A. Shahar, E. D. Young, J. Wang, A. Steele, S. Borensztajn, S. M. Vitale, E. S. Bullock, N. Wehr & J. Badro, (2025) Experiments reveal extreme water generation during planet formation, Nature volume 648, pages551–555

بحثت دراسات النمذجة الحديثة في توازن محيط الصهارة مع غلاف جوي غني بالهيدروجين، مع التركيز على تطبيقها على الكواكب الشبيهة بنبتون، وهي أكثر أنواع الكواكب الخارجية وفرة التي تم اكتشافها والتي لا يوجد لها نظير في النظام الشمسي. يُعتقد أن العديد من الكواكب الشبيهة بنبتون لها باطن صخري منصهر محاط بأغلفة جوية كثيفة من الهيدروجين. تعمل هذه الأغلفة الجوية كغطاء حراري، مما يحافظ على سخونة محيطات الصهارة لمليارات السنين والتي يمكن أن يؤدي خلالها التفاعل بين هذين الخزانين إلى تكوين الماء

نقدم هنا تجارب جديدة تبحث في التفاعل بين غلاف جوي يحتوي على الهيدروجين ومحيط صهارة بدائي يحتوي على الحديد عند ضغط ودرجة حرارة عاليين. تم موازنة السيليكات مع غاز الهيدروجين وتسخينها إلى درجات حرارة أعلى من درجة الانصهار. صُممت التجارب للتحقق مما إذا كان هناك




فى الشكل يوضح : على اليسار، تُحمل طور السوائل الحرة والفقاعات الغنية بالحديد في محيط الصهارة. في الوسط: ينطلق الماء مُكوّنًا جوًا بخاريًا بينما تغوص الفقاعات الغنية بالحديد نحو المركز. على اليمين: سيناريو متطرف تكون فيه جميع الأطوار قابلة للامتزاج.

تُسهم النتائج في تعزيز فهمنا لإنتاج الماء أثناء تكوين وتطور الأجرام السماوية، وتُعدّ مفتاحًا لتوضيح جوانب من باطن وأغلفة الكواكب الشبيهة بنبتون. ركزت الدراسات التجريبية السابقة على نطاق ضغط أصغر، حيث اقتصرت على دراسة أنظمة مبسطة بطريقة نوعية. في المقابل، بحثت الدراسات النظرية التفاعل في النظام المعقد، لكن معايير أساسية مثل ذوبانية الهيدروجين في الظروف ذات الصلة ظلت مجهولة. نقدم هنا إطارًا مستمدًا تجريبيًا لتفاعل نظام معدني متعدد الأكاسيد مع الهيدروجين. نُبين بشكل قاطع أن كمية كبيرة من الهيدروجين تذوب في الصهارة، وأن أكسيد الحديد الثنائي (FeO) يُختزل إلى حديد (Fe)، وأن الماء الناتج عن

التفاعل يُشكل طورًا سائلًا حرًا عند ضغط منخفض، ويصبح قابلًا للامتزاج مع السيليكات عند ضغط أعلى من 45 جيجا باسكال. بالإضافة إلى ذلك، يُمكن أن يُمثل اختزال الأكاسيد الأخرى الموجودة في الصهارة مسارًا إضافيًا لتكوين الماء. تتوافق نتائجنا التجريبية نوعيًا مع الدراسات الحديثة حول الكواكب الخارجية، والتي تتوقع وجود حجم كبير من الماء الداخلي الناتج عن تفاعل محيط الصهارة مع الغلاف الجوي. في باطن الكواكب، تعتمد كمية الماء المُنتَج ومصيره على الأكاسيد المتاحة، وبشكلٍ حاسم على درجة التفاعل بين الصهارة السيليكاتية والهيدروجين. بالنسبة للأجرام الكوكبية التي لا تملك كتلة كافية للاحتفاظ بغلاف جوي في مرحلة محيط الصهارة المبكرة، يكون دخول الهيدروجين محدودًا على الأرجح. مع ذلك، بمجرد أن تنمو الكواكب لتصل كتلتها إلى حوالي 0.25 من كتلة الأرض أو أكثر، يمكن الاحتفاظ بأغلفة غنية بالهيدروجين مع وجود محيطات صهارة تحتها، مما يؤدي إلى انبعاث كميات كبيرة من الهيدروجين وإنتاج الماء الداخلي. تتحكم درجة الحرارة في ذوبان الهيدروجين، بينما تتحكم الطبيعة الديناميكية لمحيط الصهارة في وصول الأكاسيد إلى الأجزاء السطحية واختزالها. من الممكن تصور سيناريوهات يتم فيها إطلاق الماء في الغلاف الجوي مُكوّنًا غلافًا جويًا بخاريًا، أو سيناريوهات يتم فيها احتجازه في محيط الصهارة وتراكمه في الأعماق. يُعدّ توصيف محيط الصهارة الديناميكي وتأثيراته على موازنات المواد المتطايرة أمرًا بالغ الصعوبة. مع ذلك، تُؤكد النتائج أهمية هذه الدراسات، إذ قد يكون الهيدروجين والماء أكثر انتشارًا مما كان متوقعًا سابقًا في الكواكب التي تتراكم عليها المواد مع غلاف جوي من الهيدروجين يعلو باطنًا منصهرًا.

يُعد فهم الأنظمة الغنية بالمواد المتطايرة أمرًا محوريًا لاستكشاف سمة محتملة للكواكب الشبيهة بنبتون: وهي الامتزاج التام بين الأطوار، مُشكلةً طورًا مختلطًا واحدًا في الحالة فوق الحرجة في الوشاح. يُمثل موضع منحنى الذوبان للنظام المتوازن مع المواد المتطايرة الحد الفاصل بين باطن "قياسي" بأطوار منفصلة وآخر في الحالة فوق الحرجة. تُشير نتائجنا إلى امتزاج تام، وبالتالي ظروف أعلى من منحنى ذوبان البيروليت pyrolite + الهيدروجين عند ضغوط أعلى من 45 GPa ودرجات حرارة أعلى من 4500 كلفن لتركيز الهيدروجين في تجاربنا. تُشير حسابات ab initio التي أُجريت على نظام $MgSiO_3 + H_2$ إلى امتزاج تام في نطاق الضغط ودرجة الحرارة المُتوافق مع تجاربنا.

في نهاية المطاف، إلى جانب إنتاج الماء، يؤدي اختزال أكسيد الحديد الثنائي (FeO) إلى تكوين طور غني بالحديد. ويعتمد غرق هذا الطور إلى النواة على خصائصه الكيميائية والفيزيائية، بالإضافة إلى كتلة الكوكب. ففي

الكواكب الصغيرة، يُتوقع أن يغرق الطور الغني بالحديد إلى النواة. أما في الكواكب الأكبر حجمًا، حيث تكون درجات الحرارة أعلى، فقد يؤدي تركيز العناصر الخفيفة في الطور الغني بالحديد المتكون من خلال هذه العملية إلى انخفاض كثافته لدرجة تجعله متعادل الطفو.

وبغض النظر عن الشكوك المحيطة بالامتزاج الكامل، تكشف نتائجنا التجريبية عن مسار بديل لدمج الماء في باطن الكواكب. وتُظهر ذوبانية الهيدروجين المقاسة في مصهور السيليكات المبرد أن كميات كبيرة من الهيدروجين يمكن تخزينها في محيط الصهارة بالتزامن مع تكوّن الماء. وقد يكون لآليات التخزين هذه آثارٌ غير مستكشفة، ولكنها ذات أهمية محتملة، على الخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه الأنظمة، وبالتالي على خصائص الكوكب على نطاق واسع وقابليته للحياة.



تستخدم دراسة جديدة تجارب مخبرية لإثبات أن الماء يتكون طبيعيًا أثناء عملية تكوين الكواكب. فمن خلال ضغط وتسخين مواد تحاكي الكواكب بين طرفي ماسة diamonds، أثبت علماء من معهد كارنيجي Carnegie، ومعهد فيزياء الأرض والجيوفيزياء IPGP، وجامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس، أن التفاعلات بين الغلاف الجوي لكوكب فتي ومحيطه الصهاري البدائي تُنتج الماء وتُذيب الهيدروجين في الصهارة. لهذا العمل آثار بالغة الأهمية على فهمنا لصلاحية الكواكب للحياة والبحث عن الكواكب الخارجية التي قد تستضيفها. (Credit Image courtesy of Navid Marvi/Carnegie Science)

## أول رصد لأيون الهيدروكسيل ($OH^+$) في السدم الكوكبية

في السدم الكوكبية، يبدو أن انبعاث خط الدوران لأيون الهيدروكسيل (OH+) ينتج في منطقة التفكك الضوئي (PDR) لهذه الأجسام. ويُلاحظ انبعاث أيون الهيدروكسيل فقط في السدم الكوكبية ذات النجوم المركزية الساخنة (Teff> 100 000 K)، مما يشير إلى أن الفوتونات عالية الطاقة قد تلعب دورًا في تكوين أيون الهيدروكسيل وإثارة خطه الطيفي في هذه الأجسام، كما يبدو الحال في المجرات فائقة اللمعان[1].

يلعب أيون الهيدروكسيل الجزيئي ($OH^+$) دورًا هامًا في كيمياء المركبات الحاملة للأكسجين وفي تكوين الماء في الفضاء. يمكن أن تؤدي تفاعلات هذا الأيون مع جزيء الهيدروجين ($H_2$) إلى تكوين أيوني الهيدرونيوم ($H_2O^+$) والهيدروكسيد ($H_3O^+$)، اللذين يتحدان مع الإلكترونات لتكوين الماء. تشير النماذج إلى أن وفرة هذه المركبات تتأثر بتدفق الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية والأشعة الكونية. يمكن استخدام رصد أيوني $OH^+$ و$H_2O^+$، على سبيل المثال، لاستنتاج معدلات تأين الأشعة الكونية. كما يمكن إنتاج أيون $OH^+$ في وسط متأين بفعل الصدمات.

في الوسط بين النجوم (ISM)، يُعتقد أن أيون OH+ يتكون عبر مسارين رئيسيين: الأول هو تفاعل أيون الأكسجين (O+) مع جزيء الهيدروجين (2H)، والآخر هو تفاعل الأكسجين (O) مع الهيدروجين (H). المعادلة الرياضية: OH+ = 3. ينتج المسار الأول أيون الهيدروكسيل (OH+) بكفاءة أعلى عند قيمة AV تقارب 0.1، بينما ينتج المسار الثاني أيون الهيدروكسيل (OH+) بكفاءة أعلى عند قيمة AV تقارب 6 (حيث تعتمد القيمة الدقيقة على شدة مجال الإشعاع).

في الوسط بين النجوم، يُعتقد أن أيون الهيدروكسيل ($OH^+$) يتكون عبر مسارين رئيسيين: الأول هو تفاعل أيون الأكسجين ($O^+$) مع جزيء الهيدروجين ($H_2$)، والآخر هو تفاعل الأكسجين (O) مع أيون الهيدروجين ($H_3^+$). ينتج المسار الأول أيون الهيدروكسيل ($OH^+$) بكفاءة أكبر عند قيمة $A_V \sim 0.1$، بينما ينتج المسار الثاني أيون الهيدروكسيل ($OH^+$) بكفاءة أكبر عند قيمة $A_V \sim 6$ (حيث تعتمد القيمة الدقيقة على شدة مجال الإشعاع).

[1] I. Aleman, T. Ueta, D. Ladjal, K. M. Exter, J. H. Kastner, R. Montez Jr., A. G. G. M. Tielens, Y.-H. Chu, H. Izumiura, I. McDonald, R. Sahai, N. Siódmiak, R. Szczerba, P. A. M. van Hoof, E. Villaver, W. Vlemmings, M. Wittkowski and A. A. Zijlstra, Herschel Planetary Nebula Survey (HerPlaNS) First detection of OH+ in planetary nebulae, Astronomy & Astrophysics (A&A), Volume 566, June 2014 A79

في مناطق التفكك الضوئي (PDRs)، بالإضافة إلى التفاعل بين أيون الأكسجين ($O^+$) وجزيء الهيدروجين ($H_2$)، قد يُساهم التأين الضوئي لأيون الهيدروكسيل (OH) وتبادل الشحنات بينه وبين أيون الهيدروجين ($H^+$) في تكوين أيون الهيدروكسيل ($OH^+$). علاوة على ذلك، تُظهر نماذج مناطق التفكك الضوئي أن إنتاج أيون الهيدروكسيل ($OH^+$) يكون أكثر كفاءة في نظامين مختلفين: (1) السحب منخفضة الكثافة ذات المستويات المنخفضة من الأشعة فوق البنفسجية ($10^3$–$1 \sim \chi$ و $n< 10^3cm^{-3}$)، (2) البيئات عالية الكثافة ذات المستويات العالية من الأشعة فوق البنفسجية ($10^5$–$10^4 \sim \chi$ و $n> 10^5cm^{-3}$)، حيث تُعرَّف χ بأنها النسبة بين تدفقات المصدر وتدفقات مجال الإشعاع بين النجوم عند طاقة الفوتون$h\nu$ eV = 12.4 إلكترون فولت (=1000 Åأنغستروم)، وبالتالي فهي مقياس لشدة مجال الإشعاع.

في معظم المصادر التي رُصد فيها أيون الهيدروكسيل ($OH^+$)، تظهر خطوطه في نطاق الامتصاص، وتُعزى عادةً إلى السحب النجمية المنتشرة المتأينة بفعل مجال الإشعاع النجمي المجري والأشعة الكونية، أو بفعل فوتونات الأشعة فوق البنفسجية البعيدة المنبعثة من النجوم القريبة. وقد رُصد أيون الهيدروكسيل ($OH^+$) لأول مرة في الوسط بين النجمي باتجاه السحابة الجزيئية العملاقة القوس 2B باستخدام تلسكوب تجربة أتاكاما الرائدة (APEX). كما رُصدت خطوط امتصاص أيون الهيدروكسيل ($OH^+$) على امتداد عدة خطوط رؤية في الوسط بين النجمي المجري باتجاه مصادر الطيف المستمر الساطعة، مثل السحب الجزيئية في كوكبة الجبار ومنطقة تكوين النجوم الضخمة 5W3 IRS. تم رصد خطوط أيون الهيدروكسيل ($OH^+$) في امتصاص المادة المحيطة بالنجوم الفتية وفي المجرتين NGC 4418 وArp 220.

حصل مسح هيرشل Herschel للسدم الكوكبية على صور وأطياف واسعة النطاق بالأشعة تحت الحمراء البعيدة لأحد عشر سديمًا كوكبيًا معروفًا باستخدام جهازي PACS وSPIRE على متن مرصد هيرشل الفضائي. قائمة الأهداف محدودة الحجم - إذ تقع جميع السدم الكوكبية PNe على مسافات أقل من 1.5 kpc$\lesssim$ - وتهيمن عليها سدم ذات إثارة عالية نسبيًا. تم اختيار سدم HerPlaNS الكوكبية من قائمة أهداف مسح تشاندرا الأولي للسدم الكوكبية، مع مراعاة إمكانية رصدها في نطاق الأشعة تحت الحمراء البعيدة، استنادًا إلى عمليات رصد سابقة باستخدام أجهزة IRAS وISO وSpitzer وAKARI. أحد أهداف هذا الاختيار هو دراسة التأثيرات المحتملة للأشعة السينية على فيزياء وكيمياء غاز السديم وتجلياتها في انبعاثات الأشعة تحت الحمراء البعيدة.

تم تضمين الأجرام NGC 7293 وNGC 6853 وNGC 7027، التي رُصدت أيضًا بواسطة هيرشل، للمقارنة. نقدم فيما يلي وصفًا موجزًا للملاحظات وتقنيات معالجة البيانات.

في ثلاثة من أصل أحد عشر سديمًا كوكبيًا رُصدت في مجرة HerPlaNS، وهي NGC 6445 وNGC 6720 وNGC 6781، رصدنا أربعة خطوط طيفية لأيون الهيدروكسيل (OH+) في الانبعاث: الخط عند 152.99 ميكرومتر في أطياف PACS، والخطوط عند 290.20 و308.48 و329.77 $\mu m$ ميكرومتر في أطياف SPIRE. تنتج هذه الخطوط عن أدنى انتقالات الدوران للحالة الإلكترونية الأرضية لأيون الهيدروكسيل ($OH^+$)، كما هو موضح في مخطط مستويات طاقة أيون الهيدروكسيل ($OH^+$). في هذا الشكل، تُشير الخطوط الرأسية الحمراء المتصلة إلى الانتقالات المرصودة. يشير الخط المتقطع إلى الانتقال الذي يُنتج الخط الطيفي عند 152.37 ميكرومتر، والذي تم رصده (بنسبة إشارة إلى ضوضاء أعلى من 3.0) فقط في أطياف PACS للمجرة NGC 6445. بالإضافة إلى ذلك، حددنا خطين طيفيين عند 119.23 ميكرومتر و119.44 ميكرومتر كخطين ثنائيين لجزيء OH، وفقًا للمعادلة الرياضية: $^2\pi_{3/2}J = 5/_2{-}3/_2$، واللذين ينتجان عن الانتقالات بين أدنى مستويات الدوران لجزيء OH. ولتحديد الخطوط الطيفية، استخدمنا الأطوال الموجية المُقدمة من قاعدة بيانات كولونيا للطيف الجزيئي وفهرس الطيف الجزيئي لمختبر الدفع النفاث.

هنا أول رصد لأيون الهيدروكسيل ($OH^+$) في السدم الكوكبية. رُصد هذا الانبعاث في أطياف الأشعة تحت الحمراء البعيدة لكل من جهازي PACS وSPIRE لثلاثة من أصل 11 سدمًا كوكبيًا في العينة التي جُمعت في مسح هيرشل للسدم الكوكبية (HerPlaNS). كما يُبلغ هذا المجلد عن اكتشاف متزامن ومستقل لأيون الهيدروكسيل في سدمين كوكبيين آخرين في أطياف SPIRE. جميع السدم الكوكبية الخمسة (NGC 6445 وNGC 6720 وNGC 6781 في HerPlaNS، بالإضافة إلى NGC 7293 وNGC 6853) غنية بالجزيئات، ذات هياكل حلقية أو شبيهة بالحلقات، ونجوم مركزية ساخنة ($T_{eff}$> 100 000 K). يُرجح أن يكون انبعاث أيون الهيدروكسيل ناتجًا عن إثارة في منطقة تفكك جزيئي (PDR). على الرغم من أن عوامل أخرى مثل الكثافة العالية ونسبة C/O المنخفضة قد تلعب أيضًا دورًا في تعزيز انبعاث $OH^+$، فإن حقيقة أننا لا نكتشف $OH^+$ في الأجسام ذات $T_{eff}$< 100 000 K تشير إلى أن صلابة أطياف النجم المركزي المؤين (أي إنتاج الأشعة السينية اللينة، ~100-300 eV) يمكن أن تكون عاملاً مهمًا في إنتاج انبعاث $OH^+$ في السدم الكوكبية.

## ناسا ويب تحدد وجود ماء متجمد في نظام نجمي شاب

هل ينتشر الماء المتجمد في الأنظمة النجمية الأخرى؟ لطالما توقع علماء الفلك ذلك، استنادًا جزئيًا إلى رصد سابق لشكله الغازي، بخار الماء، ووجوده في نظامنا الشمسي. والآن، ثمة دليل قاطع: فقد أكد الباحثون وجود جليد الماء البلوري في قرص من الحطام الغباري يدور حول نجم شبيه بالشمس على بُعد 155 سنة ضوئية، وذلك باستخدام بيانات تفصيلية تُعرف بالأطياف من تلسكوب جيمس ويب الفضائي James Webb التابع لناسا. (يُشير مصطلح "جليد الماء" إلى تركيبه، إذ تُلاحَظ جزيئات متجمدة أخرى كثيرة في الفضاء، مثل جليد ثاني أكسيد الكربون، أو "الجليد الجاف"). وفي عام 2008، أشارت بيانات من تلسكوب سبيتزر Spitzer الفضائي التابع لناسا، والذي توقف عن العمل، إلى إمكانية وجود ماء متجمد في هذا النظام[1].

قال تشين شي Chen Xie، المؤلف الرئيسي للدراسة الجديدة وباحث مساعد في جامعة جونز هوبكنز Johns Hopkins في بالتيمور Baltimore، ميريلاند: "رصد تلسكوب جيمس ويب بوضوح ليس فقط جليد الماء، بل جليد الماء البلوري، الموجود أيضاً في مواقع مثل حلقات زحل والأجرام الجليدية في حزام كايبر في نظامنا الشمسي".

جميع جزيئات الماء المتجمدة التي رصدها ويب مرتبطة بجزيئات غبار دقيقة منتشرة في جميع أنحاء القرص، أشبه بكرات ثلجية صغيرة متسخة. انتظر علماء الفلك هذه البيانات الحاسمة لعقود. تقول كريستين تشين، المؤلفة المشاركة وعالمة الفلك في معهد علوم تلسكوب الفضاء في بالتيمور: "عندما كنت طالبة دراسات عليا قبل 25 عاماً، أخبرني مشرفي بوجود جليد في أقراص الحطام، ولكن قبل ويب، لم تكن لدينا أجهزة حساسة بما يكفي لإجراء هذه الملاحظات". الأمر الأكثر إثارة للدهشة هو أن هذه البيانات تُشابه نتائج رصد التلسكوب الحديثة لأجرام حزام كايبر في نظامنا الشمسي.

يُعدّ جليد الماء عنصرًا أساسيًا في الأقراص المحيطة بالنجوم الفتية، إذ يُؤثر بشكل كبير على تكوين الكواكب العملاقة، وقد ينتقل أيضًا عبر أجرام صغيرة كالمذنبات والكويكبات إلى الكواكب الصخرية المكتملة التكوين. والآن، بعد أن رصد الباحثون جليد الماء بواسطة تلسكوب جيمس ويب الفضائي، فقد فتحوا آفاقًا جديدة

---

[1] ( https://science.nasa.gov/missions/webb/another-first-nasa-webb-identifies-frozen-water-in-young-star-system , 14 May 2025

أمام جميع الباحثين لدراسة كيفية حدوث هذه العمليات بطرق جديدة في العديد من الأنظمة الكوكبية الأخرى.




لأول مرة، أكد باحثون وجود جليد مائي بلوري في قرص من الحطام الغباري يدور حول نجم شبيه بالشمس، وذلك باستخدام تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا. وقد وُجد أن جميع المياه المتجمدة التي رصدها ويب مرتبطة بجزيئات غبار دقيقة منتشرة في جميع أنحاء القرص. وتركزت معظم كميات الجليد المائي المرصودة في المناطق الأبرد والأبعد عن النجم. وكلما اقترب الباحثون من النجم، قلّت كمية الجليد المائي التي عثروا عليها. NASA, ESA, CSA, Ralf Crawford (STScI)

النجم، المصنف تحت اسم HD 181327، أصغر بكثير من شمسنا. يُقدّر عمره بنحو 23 مليون سنة، مقارنةً بعمر الشمس البالغ 4.6 مليار سنة. يُعدّ هذا النجم أكبر كتلةً من الشمس، وأكثر حرارةً، مما أدى إلى تكوّن نظام نجمي أكبر قليلاً حوله. تؤكد رصدات تلسكوب جيمس ويب وجود فجوة كبيرة بين النجم وقرص الحطام المحيط به - وهي منطقة واسعة خالية من الغبار. في المناطق الأبعد، يُشبه قرص الحطام حزام كايبر في نظامنا الشمسي، حيث توجد الكواكب القزمة والمذنبات وقطع أخرى من الجليد والصخور (والتي تتصادم أحيانًا مع بعضها البعض). قبل مليارات السنين، كان حزام كايبر على الأرجح مشابهًا لقرص الحطام المحيط بهذا النجم.

يقول تشين: "يُعدّ HD 181327 نظامًا نشطًا للغاية. تحدث تصادمات منتظمة ومستمرة في قرص الحطام المحيط به. عندما تتصادم هذه الأجسام الجليدية، تُطلق جزيئات دقيقة من جليد الماء المُغبر، وهي ذات حجم مثالي لرصدها بواسطة تلسكوب ويب". لا يتوزع جليد الماء بالتساوي في هذا النظام. يتركز معظمه في المناطق

الأبرد والأبعد عن النجم. يقول شي: "تتكون المنطقة الخارجية من قرص الحطام من أكثر من 20% من جليد الماء".

كلما اقترب الباحثون من مركز القرص، قلّ ما وجدوه من جليد الماء. ففي منتصف قرص الحطام تقريبًا، رصد تلسكوب جيمس ويب حوالي 8% من جليد الماء. ومن المرجح أن جزيئات الماء المتجمدة تتشكل هنا بوتيرة أسرع قليلًا من وتيرة تحللها. أما في منطقة قرص الحطام الأقرب إلى النجم، فلم يرصد تلسكوب ويب أي جليد ماء تقريبًا. ومن المرجح أن ضوء النجم فوق البنفسجي يُبخر أقرب جزيئات جليد الماء. ومن المحتمل أيضًا أن تكون الصخور المعروفة بالكواكب الصغيرة قد "حبست" الماء المتجمد في باطنها، وهو ما لا يستطيع تلسكوب ويب رصده.

سيواصل هذا الفريق، إلى جانب العديد من الباحثين الآخرين، البحث عن جليد الماء ودراسته في أقراص الحطام والأنظمة الكوكبية النشطة التكوين في مجرتنا درب التبانة. ويضيف شي: "يُسهم وجود جليد الماء في تسهيل تكوين الكواكب". قد تصل المواد الجليدية في نهاية المطاف إلى الكواكب الأرضية التي قد تتشكل على مدى مئات الملايين من السنين في أنظمة كهذه. رصد الباحثون النجم HD 181327 باستخدام مطياف الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIRSpec) التابع لتلسكوب جيمس ويب الفضائي، وهو جهاز فائق الحساسية لجزيئات الغبار الخافتة للغاية التي لا يمكن رصدها إلا من الفضاء. يُعدّ تلسكوب جيمس ويب الفضائي المرصد العلمي الفضائي الأبرز في العالم. ويساهم في حلّ ألغاز نظامنا الشمسي، والنظر إلى ما وراءه نحو عوالم بعيدة تدور حول نجوم أخرى، واستكشاف البنى الغامضة وأصول كوننا ومكاننا فيه. ويُعدّ ويب برنامجًا دوليًا تقوده وكالة ناسا بالتعاون مع شركائها، وكالة الفضاء الأوروبية (ESA) ووكالة الفضاء الكندية (CSA).

## الماء القديم في القرص الكوكبي الأولي أقدم من نجمه

تشير وفرة $D_2O$ العالية مقارنةً بـ $H_2O$ في قرص V883 Ori إلى أن الماء في هذا القرص موروث على الأرجح. ويتعزز هذا الاستنتاج بنسبة $HDO/H_2O$ الغازية العالية الملاحظة في أغلفة النجوم الأولية وأقراصها ومذنباتها، وكذلك النسبة العالية لـ $HDO/H_2O$ في الجليد الموجود في نجم أولي واحد منخفض الكتلة ونجمين أوليين ضخمين[1]. مع ذلك، وُجد أن وفرة $CH_2DOH$ و$CH_3CDO$ و$CH_3OCDO$ و$CH_2DOCHO$، مقارنةً بنظائرها الرئيسية، أقل في قرص V883 Ori منها في النجم الأولي الساخن الأصغر سنًا IRAS 16296 B والمذنب P67. وقد فُسِّر هذا المستوى المنخفض من الديوتريوم في قرص V883 Ori على أنه مؤشر على إعادة معالجة بعض جزيئات COM.

يُعتقد تقليديًا أن المركبات العضوية المتجانسة (COMs) تتشكل في جليد غني بثاني أكسيد الكربون، ولكن توجد مؤشرات في قرص V883 Ori على أن هذه المركبات ربما تكون قد تشكلت جزئيًا في مصفوفة جليدية غنية بالماء ($H_2O$). من المتوقع أن يكون لمساهمة المركبات العضوية المتجانسة المتشكلة في المصفوفة الجليدية الغنية بثاني أكسيد الكربون نسبة D/H أعلى، نظرًا لأن عملية الديوتيريوم فعالة عند درجة الحرارة التي يتجمد عندها ثاني أكسيد الكربون. من المحتمل أن تتبع مستويات الديوتيريوم الأولية لهذه المركبات نسبة $D_2O/HDO$، حيث يتشكل كل من $D_2O$ و$HDO$ في الوقت نفسه. تتوافق مستويات الديوتريوم الملاحظة في نسبة $CH_2DOH/CH_3OH$ البالغة $1.97x10^{-2}$ والحدود العليا المنخفضة للديوتريوم في $CH_2DOH$ و$CH_3CDO$ و$CH_3OCDO$ و$CH_2DOCHO$ التي $\lesssim (5.7–20) \times 10^{-3}$ مع نسبة $D_2O/HDO$ البالغة $(8.5 \pm 2.8)x10^{-3}$ في هذا القرص. مع ذلك، يمكن للتفاعلات الكيميائية التي يتم فيها تبادل أو انتزاع الهيدروجين والديوتيريوم أن تُغير نسبة D/H في المركبات العضوية، مما يُعقّد التحليل. على الرغم من أنه من المرجح أن تتشكل المركبات العضوية جزئيًا على الأقل في مصفوفة الجليد الغنية بأول أكسيد الكربون، فإن مساهمة المركبات العضوية المتشكلة داخل مصفوفة جليد الماء ستكون ذات مستوى ديوتريوم منخفض نظرًا لارتفاع درجات حرارة الغاز وقت التكوين، مما يجعل الديوتريوم غير فعال.

---

[1] ( Margot Leemker, John J. Tobin, Stefano Facchini, Pietro Curone, Alice S. Booth, Kenji Furuya & Merel L. R. van 't Hoff, Pristine ices in a planet-forming disk revealed by heavy water, Nature Astronomy volume 9, P. 1486–1494 (2025)

إن انتقال الماء من الجليد الموجود على حبيبات الغبار في السحابة قبل ولادة النجوم إلى القرص، ثم إلى المذنبات، يربط بين المراحل الرئيسية في تكوين الكواكب، إذ يُرجح أن المذنبات تتشكل من نفس مخزون المواد التي تتشكل منها الكواكب. تُظهر نتائجنا أن الماء النقي الذي تشكل في المراحل الأولى لتكوين النجوم والكواكب متوفر في الأقراص الكوكبية الأولية، وهي مرحلة تُلاحظ فيها دلائل محتملة على وجود كواكب مُدمجة بشكل متكرر، على سبيل المثال، في شكل بنى فرعية من الغبار. على الرغم من أن مسار الماء من القرص إلى الأرض لا يزال محل نقاش، وأن نسبة الديوتيريوم في محيطات الأرض أقل من نسبة $HDO/H_2O$ في قرص V883 Ori، إلا أن نسبة الديوتيريوم في محيطات الأرض أعلى بعشرة أضعاف مقارنةً بالوسط بين النجمي. علاوة على ذلك، فإن نسبة $D2O/H_2O$ متقاربة بين الأجسام من الفئة 0، وقرص V883 Ori، والمذنب. إلى جانب زيادة الديوتيريوم التي لوحظت في HDO عبر جميع هذه المراحل الأربع، يشير هذا إلى أن مسار الماء الموروث لا يتوقف عند المرحلة المذنبية ولكنه قد يستمر إلى الماء الموجود على الكواكب الخارجية المتكونة في الأقراص الكوكبية الأولية الغنية بالجليد المائي.

## هابل يكتشف بخار الماء في الغلاف الجوي لكوكب خارجي صغير

يُبدي علماء الفلك اهتمامًا كبيرًا عند العثور على أدلة على وجود بخار الماء على الكواكب الخارجية. وبناءً على رصد تلسكوب هابل الفضائي، يُعدّ الكوكب GJ 9827d مثالًا حديثًا، إذ يُحتمل أن يكون له غلاف جوي غني بالماء. الماء من أكثر الجزيئات شيوعًا في الكون، وتحتاجه جميع أشكال الحياة على الأرض[1]. فهو يعمل كمذيب ممتاز ويُمكّن التفاعلات الكيميائية الحيوية في الخلايا البيولوجية. لا يتجاوز قطر GJ 9827d ضعف قطر الأرض، وقد يكون مثالًا على عوالم أخرى غنية بالماء في مجرتنا. لكن لا تُخطط لشراء عقار هناك، فالكوكب حارٌّ ككوكب الزهرة، ما يجعله عالمًا رطبًا. باستخدام تلسكوب هابل الفضائي، رصد علماء الفلك، بمن فيهم لورا كريدبيرغ Laura Kreidberg وتوماس ميكال إيفانز Thomas Mikal-Evans من معهد ماكس بلانك Max Planck لعلم الفلك في هايدلبرغ Heidelberg بألمانيا، أصغر كوكب خارج المجموعة الشمسية، حيث اكتشف العلماء بخار الماء في غلافه الجوي. يقع هذا الكوكب، المسمى GJ 9872d، على بُعد 97 سنة ضوئية في كوكبة الحوت.



هذه الصورة هي تصور فني للكوكب الخارجي GJ 9827d، وهو أصغر كوكب خارجي تم رصد بخار الماء في غلافه الجوي. قد يكون هذا الكوكب مثالًا على الكواكب المحتملة ذات الأغلفة الجوية الغنية بالماء في أماكن أخرى من مجرتنا. يبلغ قطر الكوكب ضعف قطر الأرض تقريبًا، ويدور حول النجم القزم الأحمر GJ 9827. يظهر كوكبان داخليان في النظام على اليسار. تم رسم النجوم الخلفية كما تُرى بالعين المجردة عند النظر باتجاه شمسنا. مع ذلك، فإن الشمس خافتة جدًا بحيث لا يمكن رؤيتها. النجم الأزرق في أعلى اليمين هو قلب الأسد

[1] ( https://www.mpia.de/news/science/2024-03-gj9827d-water-world

(Regulus)، والنجم الأصفر في أسفل المنتصف هو ذنب الأسد (Denebola)، والنجم الأزرق في أسفل اليمين هو السماك الأعزل (Spica). تظهر كوكبة الأسد على اليسار، وكوكبة العذراء على اليمين. كلا الكوكبتين مشوهتان عن رؤيتنا من الأرض من مسافة 97 سنة ضوئية. (Credits: NASA, ESA, Leah Hustak (STScI), Ralf Crawford (STScI

قال بيورن بينيك Björn Benneke، عضو الفريق من معهد تروتييه Trottier لأبحاث الكواكب الخارجية في جامعة مونتريال بكندا: "ستكون هذه المرة الأولى التي نتمكن فيها من إثبات وجود كواكب ذات أغلفة جوية غنية بالماء حول نجوم أخرى، وذلك من خلال رصد الغلاف الجوي". وأضاف: "هذه خطوة مهمة نحو تحديد مدى انتشار وتنوع الأغلفة الجوية على الكواكب الصخرية". وأضافت لورا كريدبيرغ، مديرة قسم فيزياء الغلاف الجوي للكواكب الخارجية (APEx) في معهد ماكس بلانك لعلم الفلك والفيزياء الفلكية، والباحثة الرئيسية المشاركة في برنامج الرصد الأساسي لتلسكوب هابل الفضائي: "يُعدّ اكتشاف الماء على كوكب بهذا الحجم إنجازًا تاريخيًا". وتابعت: "يقربنا هذا الاكتشاف أكثر من أي وقت مضى من تحديد خصائص عوالم شبيهة بالأرض".

ومع ذلك، لا يزال من السابق لأوانه معرفة ما إذا كان تلسكوب هابل قد قاس طيفياً كمية صغيرة من بخار الماء في جو غني بالهيدروجين أو ما إذا كان الغلاف الجوي للكوكب يتكون في الغالب من الماء، الذي خلفه بعد تبخر غلاف جوي بدائي من الهيدروجين/الهيليوم تحت تأثير الإشعاع النجمي.

قال بيير ألكسيس روي، الباحث الرئيسي في معهد تروتييه لأبحاث الكواكب الخارجية بجامعة مونتريال في كندا، والمؤلف الرئيسي للورقة العلمية: "صُمم برنامجنا الرصدي، بقيادة الباحث الرئيسي إيان كروسفيلد من جامعة كانساس في لورانس، كانساس، خصيصًا ليس فقط لرصد الجزيئات في غلاف الكوكب الجوي، بل للبحث تحديدًا عن بخار الماء. وستكون أي من النتيجتين مثيرة للاهتمام، سواء كان بخار الماء هو السائد أو مجرد عنصر ضئيل في غلاف جوي غني بالهيدروجين".

ومع ذلك، ونظرًا لعمر الكوكب GJ 9872d الذي يبلغ حوالي ستة مليارات سنة وقربه من نجمه المضيف، فمن المفترض أنه فقد معظم هيدروجينه البدائي نتيجة الإشعاع المكثف، تاركًا على الأرجح غلافًا جويًا يهيمن عليه بخار الماء. إضافةً إلى ذلك، باءت جميع محاولات رصد آثار الهيدروجين بالفشل حتى الآن. وأضاف بينيك: "حتى الآن، لم نتمكن من رصد الغلاف الجوي لكوكب صغير كهذا بشكل مباشر. ونحن الآن نقترب تدريجيًا من تحقيق ذلك". "في مرحلة ما، أثناء دراستنا للكواكب الأصغر حجمًا، لا بد من حدوث تحول حيث ينعدم الهيدروجين على هذه العوالم الصغيرة، وتصبح أغلفة جوية لها أشبه بكوكب الزهرة، الذي يهيمن عليه الكربون."

# المراجع

1. Hartnett, J.G., Look-back time in our galactic neighbourhood leads to a new cosmogony, Journal of Creation 17(1):73–79, 2003
2. Hartnett, J.G., A new cosmology: solution to the starlight travel time problem, Journal of Creation 17(2):98–102, 2003
3. Zuckerman, B. and Song, I., Dusty debris disks as signposts of planets: implications for Spitzer space telescope, Astrophys. J. 603:738–743, 2004
4. Greaves, J.S., Holland, W. S., Moriarty-Schieven, G., Jenness, T., Dent, W. R. F., Zuckerman, B., McCarthy, C., Webb, R. A., Butner, H. M., Gear, W. K. and Walker H. J., A dust ring around ε-Eridani: analog to the young solar system, Astrophys. J. 506:L133–L137, 1998
5. Greaves, J.S., The debris disc around τ-Ceti: a massive analogue to the Kuiper Belt, M.N.R.A.S. 351:L54–L58, 2004
6. Worraker, B.J., Missing: a source of short period comets, Journal of Creation 18(2):121–127, 2004
7. Jewitt, D.C. and Luu, J., Crystalline water ice on Kuiper belt object (50000) Quaoar, Nature 432:731–733, 2004
8. Taylor, J.K., New discovery makes habitable worlds even less likely, Journal of Creation 19(1):19, 2005
9. Faulkner, D., A biblically-based cratering theory, Journal of Creation 13(1):100–104, 1999
10. Hartnett, J.G., Cosmological expansion in a creationist cosmology, Journal of Creation 19
11. Piani, L. et al. 2020. Earth's water may have been inherited from material similar to enstatite chondrite meteorites. Science. 369 (6507): 1110–1113
12. Crane, L. Earth may have formed with enough water to fill the oceans three times. NewScientist. Posted on NewScientist.com August 27, 2020, accessed September 3, 2020
13. Kelley, M. M. Uranian Moon Ariel's Surface Features Point to a Past Ocean Over 100 Miles Deep. Phys.org. Posted on phys.org September 29, 2025, accessed September 29, 2025

14. Kelley, M. M. Is There an Ocean Lurking Beneath One of Uranus' Moons? Planetary Science Institute. Posted on psi.edu November 17, 2024, accessed September 29, 2025
15. Strom, C. et al. 2024. Constraining Ocean and Ice Shell Thickness on Miranda from Surface Geological Structures and Stress Modeling. The Planetary Science Journal. 5 (226): 1–18.
16. Strom, C. et al. 2026. Constraining Ocean and Ice Shell Thickness on Ariel from Surface Geologic Structures and Stress Mapping. Icarus. 444: 116822
17. Wenz, J. and M. Wagh. There Are 23 Moons and Planets with Water in Our Solar System. Popular Mechanics. Posted on popularmechanics.com, last updated December 8, 2022, accessed September 29, 2025
18. Hebert, J. Jupiter's Young Moons. Acts & Facts. 52 (5): 14–16.
19. Weitereng, H. Mars orbiter finds evidence of ancient, long-lived rivers on the Red planet. Space.com. Posted on space.com May 12, 2020, accessed May 13, 2020.
20. Salese, F., et al. 2020. Sustained fluvial deposition recorded in Mars' Noachian stratigraphic record. Nature Communications. 11 (2067)
21. Gohd, C. Catastrophic Floods Rapidly Carved the Surface of Mars. Discover. Posted on discover.com November 19, 2018, accessed May 13, 2020
22. Coppedge, D. F. 2007. Crisis in Crater Count Dating. Acts & Facts. 36 (1)
23. Morris, J. D. 2011. The Failed History of Uniformitarianism. Acts & Facts. 40 (12): 15
24. Snelling, A. A. 2005. Isochron Discordances and the Role of Inheritances and Mixing of Radioisotopes in the Mantle and Crust. In Radioisotopes and the Age of the Earth: Results of a Young-Earth Creationist Research Initiative, Volume 2. L. Vardiman, A. A. Snelling, and E. F. Chaffin, eds. El Cajon, CA: Institute for Creation Research and Chino Valley, AZ: Creation Research Society, 393–524
25. Vardiman, L. 2007. RATE in Review: Unresolved Problems. Acts & Facts. 36 (12): 6
26. Humphreys, D. R. 2005. Young Helium Diffusion Age of Zircons Supports Accelerated Nuclear Decay. In Radioisotopes and the Age of the Earth:

Results of a Young-Earth Creationist Research Initiative, Volume 2. L. Vardiman, A. A. Snelling, and E. F. Chaffin, eds. El Cajon, CA: Institute for Creation Research and Chino Valley, AZ: Creation Research Society, 25-99
27. Snelling, A. A. 2005. Polonium Radiohalos: The Model for Their Formation Tested and Verified. Acts & Facts. 34 (8)
28. Morris, H. M. 1997. Where has All the Water Gone? Acts & Facts. 26 (9)
29. Morris, J. D. 2014. Traditions of a Global Flood. Acts & Facts. 43 (11)
30. Thomas, B. 2010. Texas Canyons Highlight Geologic Evidence for Catastrophe. Creation Science Update. Posted on ICR.org July 8, 2010, accessed May 13, 2020
31. Clarey, T. 2018. Grand Canyon Carved by Flood Runoff. Acts & Facts. 47 (12)
32. Hubble Reveals a New Type of Planet. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics press release, February 21, 2012, reporting on research published in Berta, Z. K. et al. 2012. The Flat Transmission Spectrum of the Super-Earth GJ1214b from Wide Field Camera 3 on the Hubble Space Telescope. The Astrophysical Journal. 747 (1)
33. Kempton, E. M-R., K. Zahnle and J. J. Fortney. 2012. The Atmospheric Chemistry of GJ 1214b: Photochemistry and Clouds. The Astrophysical Journal. 745 (1)
34. Theoretical Transit Spectra for GJ 1214b and Other 'Super-Earths'" by Alex R. Howe and Adam S. Burrows, 24 August 2012, The Astrophysical Journal
35. Williams, A. and Hartnett, J., Dismantling the big bang, Master Books, Arkansas, USA, pp. 38–49, 2005
36. Calvin, W., NASA's Spitzer and deep impact build recipe for comet soup, , 7 September 2005
37. Chang, K., Composition of a comet poses a puzzle for scientists, New York Times 7 September 2005
38. Science News, 'Venus: The Waters of Yesteryear', 120:372–373, Dec. 12, 1981
39. Erickson, J., Water on the moon: it's been there all along, ns.umich.edu, accessed 31 May 2013
40. Khan, A., New look at Apollo moon rocks reveals signs of 'native' water, Los Angeles Times articles.latimes.com, accessed 31 May 2013

41. Hauri, E.H., Weinreich, T., Saal, A.E., Rutherford, M.C. and Van Orman, J.A., High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions, Science 333(6039):213–215, 2011; www.sciencemag.org
42. Silvestru, E., The not-so-dark side of the Moon, creation.com/young-moon-active-mantle, 23 August 2011
43. Samec, R.G., Lunar formation—Collision theory fails, J. Creation 27(2):11–12, 2013
44. Walker, T., NASA pictures support biblical origin for Moon, Creation 33(2):50–52, 2011; creation.com/nasa-shrinking-moon
45. Humphreys, D.R., Starlight and Time: Solving the Puzzle of Distant Starlight in a Young Universe, Master Books, USA, 1994. In Chapter 2
46. Watters, T.R. and 10 others, Evidence of recent thrust faulting on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter camera, Science 329(5994):936–940, 20 August 2010; DOI: 10.1126/science.1189590
47. Chow, D., Incredible, shrinking Moon revealed in photos, SPACE.com, 19 August 2010; space.com/scienceastronomy/shrinking-moon-new-lunar-photos-100819.html
48. Neal-Jones, N. and Steigerwald, B., NASA's LRO Reveals 'Incredible Shrinking Moon', 19 August 2010; nasa.gov/mission_pages/LRO/news/shrinking-moon.html
49. DeYoung, D.B., Transient lunar phenomena: a permanent problem for evolutionary models of Moon formation, Journal of Creation 17(1):5–6
50. Whitcomb, J.C. and DeYoung, D.B., The Moon: It's Creation, Form and Significance, BHM Books, Winona Lake, IN, pp. 105–127, 1978
51. Kelley, M. M. Uranian Moon Ariel's Surface Features Point to a Past Ocean Over 100 Miles Deep. Phys.org. Posted on phys.org September 29, 2025, accessed September 29, 2025
52. Kelley, M. M. Is There an Ocean Lurking Beneath One of Uranus' Moons? Planetary Science Institute. Posted on psi.edu November 17, 2024, accessed September 29, 2025

53. Strom, C. et al. 2024. Constraining Ocean and Ice Shell Thickness on Miranda from Surface Geological Structures and Stress Modeling. The Planetary Science Journal. 5 (226): 1–18
54. Strom, C. et al. 2026. Constraining Ocean and Ice Shell Thickness on Ariel from Surface Geologic Structures and Stress Mapping. Icarus. 444: 116822
55. Wenz, J. and M. Wagh. There Are 23 Moons and Planets with Water in Our Solar System. Popular Mechanics. Posted on popularmechanics.com, last updated December 8, 2022, accessed September 29, 2025
56. Vieira, A. d. N. et al. 2020. The Ambivalent Role of Water at the Origins of Life. FEBS Letters. 594 (17): 2717–2733
57. Hebert, J. Jupiter's Young Moons. Acts & Facts. 52 (5): 14–16
58. Lainey, V. et al. 2024. A Recently Formed Ocean Inside Saturn's Moon Mimas. Nature. 626 (7998): 280–282.
59. Hebert, J. 2024. A Subsurface Ocean on Mimas? Creation Science Update. Posted on ICR.org March 18, 2024, accessed September 29, 2025
60. Humphreys, D. R. 1984. The Creation of Planetary Magnetic Fields. Creation Research Society Quarterly. 21 (3): 140–149.
61. https://www.psi.edu/blog/is-there-an-ocean-lurking-beneath-one-of-uranus-moons/ , 17 Nov 2024
62. https://phys.org/news/2025-09-uranian-moon-ariel-surface-features.html#google_vignette , 29 Sep 2025
63. Spencer, W. 2015. Warm icy moons. Journal of Creation. 29 (3): 97-103
64. Vieira, A. d. N. et al. 2020. The ambivalent role of water at the origins of life. FEBS Letters. 594 (17): 2717-2733
65. Humphreys, D. R. 2013. Planetary Magnetic Dynamo Theories: A Century of Failure. In Proceedings of the Seventh International Conference on Creationism. M. Horstemeyer, ed. Pittsburgh, PA: Creation Science Fellowship, 7: 5
66. Rückriemen, T., D. Breuer, and T. Spohn. 2018. Top-down freezing in a Fe-FeS core and Ganymede's present-day magnetic field. Icarus. 307: 172-196

67. Can a Top-down Freezing Core Explain Ganymede's Magnetic Field? Science Trends. Posted on sciencetrends.com August 22, 2018, updated March 14, 2020, accessed February 13, 2023
68. Bland, M. T., A. P. Showman, and G. Tobie. 2008. The production of Ganymede's magnetic field. Icarus. 198 (2): 384-399
69. Klarreich, E. Callisto's watery secret. Nature News. Posted on nature.com July 26, 2001
70. Spohn, T. and G. Schubert. 2003. Oceans in the icy Galilean satellites of Jupiter? Icarus. 161 (2): 456-467
71. Rückriemen, T. and Breuer, Doris and Spohn, Tilman (2018) Can A Top-down Freezing Core Explain Ganymede's Magnetic Field. Science Trends. ISSN 2639-1538
72. https://www.brown.edu/news/2017-07-24/moonwater
73. https://science.nasa.gov/solar-system/how-ingredients-for-water-could-be-made-on-the-surface-of-moon/
74. Hejiu Hui , Ziyan Han , Kang Shuai, Origin of water in the Moon, National Science Review, Volume 11, Issue 6, June 2024, nwae151, https://doi.org/10.1093/nsr/nwae151
75. Lewis. "First rock from the sun turns out to have ice." Science News. Nov. 30, 2012
76. https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-telescopes-find-clear-skies-and-water-vapor-on-exo-neptune/
77. https://science.nasa.gov/missions/webb/another-first-nasa-webb-identifies-frozen-water-in-young-star-system/
78. Luna Rampinelli, Stefano Facchini, Margot Leemker, Andrea Isella, Pietro Curone, Myriam Benisty, Elizabeth Humphreys, and Leonardo Testi, Water Vapor Emission at the Warm Cavity Wall of the HD 100546 Disk as Revealed by ALMA, The Astrophysical Journal Letters, 996:L17 (10pp), 2026 January 1
79. Keith Cowing, https://astrobiology.com/2023/03/learning-more-about-the-source-of-the-water-in-our-solar-system.html
80. Daniel Clery, 25 Sep 2014, https://www.science.org/content/article/half-earths-water-formed-sun-was-born

81. Carl Engelking, Nov 20, 2023, https://www.discovermagazine.com/earths-water-is-older-than-the-sun-561
82. Cleeves, L. I., et al. (2014). The ancient heritage of water ice in the solar system. Science, 345(6204), 1590-1593. Retrieved September 28, 2014, from http://www.sciencemag.org/content/345/6204/1590.short
83. L. Ilsedore Cleeves et al. 2014. The ancient heritage of water ice in the Solar System. Science, vol. 345, no. 6204, pp. 1590-1593
84. Margot Leemker, John J. Tobin, Stefano Facchini, Pietro Curone, Alice S. Booth, Kenji Furuya & Merel L. R. van 't Hoff , Pristine ices in a planet-forming disk revealed by heavy water, Nature Astronomy Volume 9 October 2025 P. 1486–1494
85. https://science.nasa.gov/universe/exoplanets/two-exoplanets-may-be-mostly-water-nasas-hubble-and-spitzer-find/
86. Ádám Boldog1,2,3, Vera Dobos4,3, László L. Kiss1,2,5, Marijn van der Perk4 and Amy C. Barr, Water content of rocky exoplanets in the habitable zone, Astronomy & Astrophysics A&A, Volume 681, January 2024, A109
87. Edwin S. Kite and Laura Schaefer, Water on Hot Rocky Exoplanets, The Astrophysical Journal Letters, 909:L22 (6pp), 2021 March 10, The American Astronomical Society
88. https://scitechdaily.com/planetary-scientists-discover-there-may-be-many-planets-with-water-rich-atmospheres/
89. Luo H, Dorn C, Deng J. The interior as the dominant water reservoir in super-Earths and sub-Neptunes. Nature Astronomy, 20 August 2024, Nature Astronomy, Volume 8, p. 1399-1407
90. Lichtenberg, T. ; Drążkowska, J. ; Schönbächler, M. ; Golabek, G. J. ; Hands, T. O., Bifurcation of Planetary Building Blocks During Solar System Formation, Science, Volume 371, Issue 6527, 22 Jan 2021, P. 365-370, American Association for the Advancement of Science AAAS
91. Douglas College Astronomy 1105 (Winter 2018) Copyright 2017 by OpenStax is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
92. Resolved ALMA observations of water in the inner astronomical units of the HL Tau disk" by Stefano Facchini, Leonardo Testi, Elizabeth Humphreys,

Mathieu Vander Donckt, Andrea Isella, Ramon Wrzosek, Alain Baudry, Malcom D. Gray, Anita M. S. Richards and Wouter Vlemmmings, 29 February 2024, Nature Astronomy

93. Aaron Werlen, Caroline Dorn, Remo Burn, Hilke E. Schlichting, Simon L. Grimm, and Edward D. Young, Sub-Neptunes Are Drier than They Seem: Rethinking the Origins of Water-rich Worlds, The Astrophysical Journal Letters, 991:L16 (9pp), 2025 September 20, Published by the American Astronomical Society
94. D. J. Whalen, M. A. Latif & C. Jessop, Abundant water from primordial supernovae at cosmic dawn, Nature Astronomy volume 9, pages741–746 (2025)
95. Lise Boitard-Crépeau, Cecilia Ceccarelli, Pierre Beck, Lionel Vacher, and Piero Ugliengo, Was Earth's Water Acquired Locally during the Earliest Phases of the Solar System Formation?, The Astrophysical Journal Letters, 987:L25 (7pp), 2025 July 10, Published by the American Astronomical Society
96. Stefano Facchini, Leonardo Testi, Elizabeth Humphreys, Mathieu Vander Donckt, Andrea Isella, Ramon Wrzosek, Alain Baudry, Malcom D. Gray, Anita M. S. Richards & Wouter Vlemmings, Resolved ALMA observations of water in the inner astronomical units of the HL Tau disk, Nature Astronomy volume 8, pages 587–595 (2024)
97. F. Miozzi, A. Shahar, E. D. Young, J. Wang, A. Steele, S. Borensztajn, S. M. Vitale, E. S. Bullock, N. Wehr & J. Badro, Experiments reveal extreme water generation during planet formation, Nature volume 648, pages551–555 (2025)
98. I. Aleman, T. Ueta, D. Ladjal, K. M. Exter, J. H. Kastner, R. Montez Jr., A. G. G. M. Tielens, Y.-H. Chu, H. Izumiura, I. McDonald, R. Sahai, N. Siódmiak, R. Szczerba, P. A. M. van Hoof, E. Villaver, W. Vlemmings, M. Wittkowski and A. A. Zijlstra, Herschel Planetary Nebula Survey (HerPlaNS) First detection of OH+ in planetary nebulae, Astronomy & Astrophysics (A&A), Volume 566, June 2014 A79
99. https://science.nasa.gov/solar-system/ocean-worlds/

100. John J. Tobin, Merel L. R. van 't Hoff, Margot Leemker, Ewine F. van Dishoeck, Teresa Paneque-Carreño, Kenji Furuya, Daniel Harsono, Magnus V. Persson, L. Ilsedore Cleeves, Patrick D. Sheehan & Lucas Cieza, Deuterium-enriched water ties planet-forming disks to comets and protostars, Nature volume 615, P. 227–230 (2023)
101. https://science.nasa.gov/missions/webb/another-first-nasa-webb-identifies-frozen-water-in-young-star-system/
102. Margot Leemker, John J. Tobin, Stefano Facchini, Pietro Curone, Alice S. Booth, Kenji Furuya & Merel L. R. van 't Hoff, Pristine ices in a planet-forming disk revealed by heavy water, Nature Astronomy volume 9, P. 1486–1494 (2025)
103. https://www.almaobservatory.org/en/press-releases/alma-traces-history-of-water-in-planet-formation-back-to-the-interstellar-medium/
104. Katerina Slavicinska, Łukasz Tychoniec, María Gabriela Navarro, Ewine F. van Dishoeck, John J. Tobin, Martijn L. van Gelder, Yuan Chen, A. C. Adwin Boogert, W. Blake Drechsler, Henrik Beuther, HDO Ice Detected toward an Isolated Low-mass Protostar with JWST, The Astrophysical Journal Letters, Volume 986, Number 2, 2025
105. https://www.universiteitleiden.nl/en/news/2025/06/is-our-water-older-than-the-sun-astronomers-find-clue-in-ice-around-young-star
106. https://observatoiredeparis.psl.eu/a-new-theory-to-explain-the.html
107. J. Aléon, D. Lévy, A. Aléon-Toppani, H. Bureau, H. Khodja & F. Brisset, Determination of the initial hydrogen isotopic composition of the solar system, Nature Astronomy volume 6, P. 458–463 (2022)
108. Quentin Kral, Paul Huet, Camille Bergez-Casalou, Philippe Thébault, Sébastien Charnoz and Sonia Fornasier, An impact-free mechanism to deliver water to terrestrial planets and exoplanets, Astronomy & Astrophysics, Volume 692 (December 2024) A&A, A70
109. https://www.jpl.nasa.gov/news/astronomers-find-largest-most-distant-reservoir-of-water/
110. https://www.jpl.nasa.gov/news/interstellar-glaciers-nasas-spherex-maps-vast-galactic-ice-regions/

111. https://science.nasa.gov/mission/spherex/
112. D. J. Whalen, M. A. Latif & C. Jessop, Abundant water from primordial supernovae at cosmic dawn, Nature Astronomy volume 9, pages741–746 (2025)
113. G. Perotti, V. Christiaens, Th. Henning, B. Tabone, L. B. F. M. Waters, I. Kamp, G. Olofsson, S. L. Grant, D. Gasman, J. Bouwman, M. Samland, R. Franceschi, E. F. van Dishoeck, K. Schwarz, M. Güdel, P.-O. Lagage, T. P. Ray, B. Vandenbussche, A. Abergel, O. Absil, A. M. Arabhavi, I. Argyriou, D. Barrado, A. Boccaletti, …G. Wright, Water in the terrestrial planet-forming zone of the PDS 70 disk, Nature volume 620, pages 516–520 (2023)
114. Marion Zannese, Benoît Tabone, Emilie Habart, Javier R. Goicoechea, Alexandre Zanchet, Ewine F. van Dishoeck, Marc C. van Hemert, John H. Black, Alexander G. G. M. Tielens, A. Veselinova, P. G. Jambrina, M. Menendez, E. Verdasco, F. J. Aoiz, L. Gonzalez-Sanchez, Boris Trahin, Emmanuel Dartois, Olivier Berné, Els Peeters, Jinhua He, Ameek Sidhu, Ryan Chown, Ilane Schroetter, Dries Van De Putte, …Mark G. Wolfire, OH as a probe of the warm-water cycle in planet-forming disks, Nature Astronomy volume 8, pages 577–586 (2024)
115. https://www.mpg.de/20541783/water-rocky-planets
116. https://www.mpia.de/news/science/2024-03-gj9827d-water-world
117. https://science.nasa.gov/missions/webb/webb-detects-water-vapor-in-rocky-planet-forming-zone/
118. https://www.mpia.de/news/science/2023-16-xue-terrestrial-planets
119. J. Aléon, D. Lévy, A. Aléon-Toppani, H. Bureau, H. Khodja & F. Brisset, Determination of the initial hydrogen isotopic composition of the solar system, Nature Astronomy volume 6, pages 458–463 (2022)
120. https://www.cnrs.fr/en/press/earths-water-was-around-earth
121. https://scitechdaily.com/astronomers-discover-missing-link-water-on-earth-is-even-older-than-our-sun/
122. https://scitechdaily.com/astronomers-discover-missing-link-water-on-earth-is-even-older-than-our-sun/

123. https://www.astronomy.com/science/ancient-earth-may-have-been-a-water-world-with-no-dry-land/
124. Benjamin W. Johnson & Boswell A. Wing, Limited Archaean continental emergence reflected in an early Archaean 18O-enriched ocean, Nature Geoscience volume 13, pages 243–248 (2020)
125. https://www.cnrs.fr/en/press/earths-water-was-around-earth
126. Jun Wu, Steven J. Desch, Laura Schaefer, Linda T. Elkins-Tanton, Kaveh Pahlevan, Peter R. Buseck, Origin of Earth's Water: Chondritic Inheritance Plus Nebular Ingassing and Storage of Hydrogen in the Core, Journal of Geophysical Research: Planets, Volume123, Issue10 October 2018 Pages 2691-2712
127. https://phys.org/news/2026-04-interstellar-glaciers-nasa-spherex-vast.html#google_vignette
128. Joseph L. Hora, Jinyoung K. Noh, Gary J. Melnick, Brandon S. Hensley, Roberta Paladini, Jeong-Eun Lee, Matthew L. N. Ashby, Volker Tolls, Jaeyeong Kim, Michael W. Werner, SPHEREx Widefield Infrared Spectral Mapping of Interstellar Ices and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, The Astrophysical Journal, Volume 1001, Number 2, 2026
129. Kathleen E. Mandt, Jacob Lustig-Yaeger, Adrienn Luspay-Kuti, Peter Wurz, Dennis Bodewits,Stephen A. Fuselier, Olivier Mousis, Steven M. Petrinec, Karlheinz J. Trattner, A nearly terrestrial D/H for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Science Advances, Volume 10, Issue 46Nov 2024
130. https://www.space.com/arrokoth-space-snowman-kuiper-belt-ice-objects
131. Anne H. Peslier, The origins of water New measurements of Earth's building blocks point to a simpler water source, Science Vol. 369, No. 6507, 2020
132. https://www.ox.ac.uk/news/2025-04-16-scientists-find-evidence-overturns-theories-origin-water-earth
133. https://www.astronomy.com/science/where-did-earths-water-come-from/
134. Eiji Ohtani, Hydrous minerals and the storage of water in the deep mantle, Chemical Geology, Volume 418, 15 December 2015, Pages 6-15

135. https://ceramics.org/ceramic-tech-today/probing-the-oceans-origins-ultrahigh-pressure-magnesium-hydrosilicates-may-have-served-as-reservoirs-of-early-water/
136. Shuning Pan, Tianheng Huang, Allona Vazan, Zhixin Liang, Cong Liu, Junjie Wang, Chris J. Pickard, Hui-Tian Wang, Dingyu Xing & Jian Sun, Magnesium oxide-water compounds at megabar pressure and implications on planetary interiors, Nature Communications volume 14, Article number: 1165 (2023)
137. Edward D. Young, Anat Shahar & Hilke E. Schlichting, Earth shaped by primordial H2 atmospheres, Nature volume 616, pages 306–311 (2023)
138. https://www.ipgp.fr/en/news-and-agenda/news/how-do-planets-acquire-their-water/
139. F. Miozzi, A. Shahar, E. D. Young, J. Wang, A. Steele, S. Borensztajn, S. M. Vitale, E. S. Bullock, N. Wehr & J. Badro, Experiments reveal extreme water generation during planet formation, Nature volume 648, pages 551–555 (2025)
140. https://science.nasa.gov/solar-system/oort-cloud/facts/
141. https://science.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/10-things-to-know-about-the-kuiper-belt/
142. M. E. Brown, E. L. Schaller, and W. C. Fraser, WATER ICE IN THE KUIPER BELT, The Astronomical Journal, Volume 143, Number 6, 2012
143. https://science.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/facts/
144. David C. Jewitt & Jane Luu, Crystalline water ice on the Kuiper belt object (50000) Quaoar, Nature volume 432, pages 731–733 (2004)
145. https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/kuiper-belt/in-depth.amp
146. Samuel P.D. Birch, Orkan M. Umurhan, Retention of CO ice and gas within 486958 Arrokoth, Icarus, Volume 413, 1 May 2024
147. K. M Barkume , M. E. Brown , and E. L. Schaller, Water Ice on the Satellite of Kuiper Belt Object 2003 EL61, The Astrophysical Journal, Volume 640, Number 1
148. C. Xie, C. H. Chen, C. M. Lisse, D. C. Hines, T. Beck, S. K. Betti, N. Pinilla-Alonso, C. Ingebretsen, K. Worthen, A. Gáspár, S. G. Wolff, B. T. Bolin, L. Pueyo, M. D. Perrin, J. A. Stansberry, and J. M. Leisenring, Water Ice in the

Exo-Kuiper Belt Around HD 181327, Nature volume 641, pages 608–611 (2025)
149. M. C. De Sanctis, E. Ammannito, A. Raponi, A. Frigeri, M. Ferrari, F. G. Carrozzo, M. Ciarniello, M. Formisano, B. Rousseau, F. Tosi, F. Zambon, C. A. Raymond & C. T. Russell, Fresh emplacement of hydrated sodium chloride on Ceres from ascending salty fluids, Nature Astronomy volume 4, pages 786–793 (2020)
150. https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/asteroid-belts
151. Michael S. P. Kelley, Henry H. Hsieh, Dennis Bodewits, Mohammad Saki, Geronimo L. Villanueva, Stefanie N. Milam & Heidi B. Hammel, Spectroscopic identification of water emission from a main-belt comet, Nature volume 619, pages 720–723 (2023)
152. https://www.sciencealert.com/water-vapor-detected-in-the-solar-systems-asteroid-belt-for-first-time
153. Michael Küppers, Laurence O'Rourke, Dominique Bockelée-Morvan, Vladimir Zakharov, Seungwon Lee, Paul von Allmen, Benoît Carry, David Teyssier, Anthony Marston, Thomas Müller, Jacques Crovisier, M. Antonietta Barucci & Raphael Moreno, Localized sources of water vapour on the dwarf planet (1) Ceres, Nature volume 505, pages 525–527 (2014)
154. Ákos Kereszturi, Mohamed Ramy El-Maarry, Anny-Chantal Levasseur-Regourd, Imre Tóth, Bernadett D. Pál and Csaba Kiss, Overview of Water-Ice in Asteroids—Targets of a Revolution by LSST and JWST, Universe 2025, Vol 11 (Issue 8), 253
155. T. H. Prettyman, N. Yamashita, M. E. Landis, J. C. Castillo-Rogez, N. Schörghofer, C. M. Pieters, H. G. Sizemore, H. Hiesinger, S. Marchi, H. Y. McSween, R. S. Park, M. J. Toplis, C. A. Raymond, C. T. Russell, Replenishment of Near-Surface Water Ice by Impacts Into Ceres' Volatile-Rich Crust: Observations by Dawn's Gamma Ray and Neutron Detector, Geophysical Research Letters, Volume 48, Issue 15, 2021
156. https://earthsky.org/space/ancient-water-in-protoplanetary-disk-older-than-star/

157. Margot Leemker, John J. Tobin, Stefano Facchini, Pietro Curone, Alice S. Booth, Kenji Furuya & Merel L. R. van ’t Hoff, Pristine ices in a planet-forming disk revealed by heavy water, Nature Astronomy volume 9, pages1486–1494 (2025)
158. https://www.universiteitleiden.nl/en/news/2025/06/is-our-water-older-than-the-sun-astronomers-find-clue-in-ice-around-young-star
159. Katerina Slavicinska, Łukasz Tychoniec, María Gabriela Navarro, Ewine F. van Dishoeck, John J. Tobin, Martijn L. van Gelder, Yuan Chen, A. C. Adwin Boogert, W. Blake Drechsler, Henrik Beuther, HDO Ice Detected toward an Isolated Low-mass Protostar with JWST, The Astrophysical Journal Letters, Volume 986, Number 2, 2025
160. https://science.nasa.gov/missions/webb/another-first-nasa-webb-identifies-frozen-water-in-young-star-system/